

STEVIN - LABORATORIUM

van de afdeling

Weg- en Waterbouwkunde

der

TECHNISCHE HOGESCHOOL

-.-.-.-.-.-.-.-

RAPPORT 6-64-2-SB-1

DE WEERSTAND VAN PRISMATISCHE STA-
LEN STAVEN MET RECHTHOEKIGE DOOR-
SNEDE BIJ HET SNEL BELASTEN OP BUI-
GING.

door J.J.P. Wolf

februari 1964.

Stevinweg 4,

Delft.

Tel. 01730-33222.

Inhoud.

pag.

Summary.	III
------------------	-----

1. Inleiding.

1.1 Algemeen	1
1.2 Vloeipuntsverhoging, vloeivertraging en reksnelheid bij het uitvloeien.	5
1.3 De ontwikkeling van dynamische plastische scharnieren.	11

2. Doel van het onderzoek en keuze van de te meten waarden

2.1 Doel en opzet van het onderzoek.	16
2.2 Te meten grootheden en de wijze van meten.	17

3. Constructie van het beproevingsstoestel.

3.1 Beschrijving en werkwijze.	20
3.2 Onderzoek naar het verloop van de kromming van het midden van de proefstaaf onder de gebruikte dynamische belasting	22
3.3 Dimensionering van de proefstaaf en het belastingssysteem.	27
3.4 Constructie en benodigde slaghoek voor de valhamer	32
3.5 Bijzondere punten.	35

4. Meetinstrumenten, ijkingen, gebruikte materialen en vervaardiging proefstukken. Resultaten statische materiaalproeven.

4.1 Meetinstrumenten	38
4.2 Ijkingen	39
4.3 Materialen, vervaardiging proefstukken	40
4.4 Resultaten statische materiaalproeven.	41

5. Resultaten van de dynamische proeven.

5.1 Metingen van de kracht in de dynamometer en van de weg van de geconcentreerde massa voor het geval, dat op de plaats van de proefstaven een zeer stijve balk is aangebracht	44
5.2 Metingen van de eigen frequenties van de proefstaaf alleen, en van de proefstaaf samen met het belastingsverdeelblok.	45
5.3 Metingen en meetresultaten voor de dynamisch belaste staven.	46

<u>6.</u>	<u>Interpretatie meetresultaten.</u>	<u>pag.</u>
6.1	Bepaling van de vloeipuntsverhoging ten gevolge van het snel belasten.	49
6.2	Berekening van de weerstand uit het elastisch ontlastende moment . . .	53
6.3	Berekening van de weerstand uit de respons op het gemeten krachtverloop in de dynamometer	54
6.4	Berekening van de weerstand uit het rekverloop en de vloeipuntsverhogingen voor een snelle belasting, waarmee grote blijvende vervormingen worden opgewekt	57
<u>7.</u>	<u>Conclusies.</u>	60
<u>8.</u>	<u>Nawoord.</u>	64
<u>9.</u>	<u>Litteratuur.</u>	66
<u>Figuren 1 t/m 37.</u>		A-1 t/m A-29
<u>Tabellen 1 t/m 11.</u>		A-30 t/m A-41

Summary.

In the introduction to this report the stress-strain behaviour of construction steel in the civil engineering field as determined in American rapid-loading tests is discussed. A method to predict the resistance of a beam against rapid lateral loading from the dynamic material properties has also been discussed.

The purpose of the tests described in this report is to determine the dynamic yield stress as depending on the rate of yielding and to determine the resistance of a beam against rapid lateral loading for the ordinary Dutch construction steel quality specified as Fe 37.

The design has been discussed of a testing machine which excites a loading pulse that attains its maximum in 15 milliseconds, and immediately afterwards falls back to zero loading. The method and reasons to determine the dimensions of the essential parts of the machine and the operation of the machine have been described. A survey of the instrumentation for the tests is given.

"Static" tests are also run on the material to determine the essential static properties of the material.

A total of six beams has been subjected to a series of rapid lateral loading pulses, the maximum of which increased with every new loading until considerable plastic deformation had been provoked in the beam. The loading pulse and the outer fiber strains in the region of pure flexure have been recorded.

With the maximum outer fiber strains and the remaining outer fiber strains for loading pulses that caused just enough plastic deformation for accurate measuring of the remaining strains, a mean value for the dynamic yield stress 17,5% above the static lower yield stress has been computed at a rate of yielding of $\pm 10\%$ sec. The maximum resistance against a loading pulse to cause considerable plastic deformation has been computed from the response of the system loaded with the recorded pulse. It was found that the six beams had been loaded to their dynamic full plastic resistance and that this resistance was 19% to 31% higher than the static full plastic resistance. For one loading pulse causing considerable plastic deformation the maximum resistance has been computed from the strain rate measured and

a graph for the dynamic yield stress as depending on the strain rate based on the literature and the computed mean dynamic yield stress for the beam in question. The maximum resistance thus computed was in reasonable agreement with the resistance computed from the recorded loading for the same pulse.

As this was the first series of rapid loading tests in the Stevin-Laboratory, much time was taken up by the development of the testing machine and the testing procedures. As time was limited the actual testing program was rather small. The given test results are, therefore, no more than an indication of the resistance against rapid lateral loading and may not be looked upon as conclusive information.

1. Inleiding.

1.1 Algemeen.

Het is gebruikelijk de constructies in de civiele techniek te ontwerpen voor het weerstaan van statische belastingen, welke in hoofdzaak als verticale belastingen voorkomen. Als statisch worden daarbij die belastingen beschouwd, waarvan de voor het ontwerpen bepalende extreme waarde wordt bereikt in een tijd van minimaal enkele minuten en die al dan niet onbeperkt lang aanwezig kan blijven. Het is mogelijk, dat binnen de levensduur van een constructie het langzaam toenemen en afnemen van de belasting tot de extreme waarde een groot aantal malen voorkomt (b.v. 10^5 belastingswisselingen in de levensduur). Zulke wisselende belastingen, vermoeiingsbelastingen, onderscheiden zich van normale statische belastingen alleen door het effect, dat ze op de materiaal-eigenschappen hebben. De vermoeiingssterkte van een materiaal is in het algemeen lager dan de statische sterkte. In de civiele praktijk worden vermoeiingsbelastingen vaak onjuist dynamische belastingen genoemd. De eigenschappen van de vermoeiingsbelasting zijn wezenlijk verschillend van die van de werkelijke dynamische belasting. De vermoeiingsbelasting valt daarom niet onder de begrippen dynamische belasting en dynamische materiaal-eigenschappen, zoals die in dit verslag worden gebruikt. Wel is het mogelijk, dat door een werkelijke dynamische belasting een groot aantal belastingsvariaties tot extreme waarden in de levensduur wordt veroorzaakt, zodat het vermoeiingseffect ook bij werkelijke dynamische belastingen een rol kan spelen. De begrippen, die zowel bij de berekening bij statische belasting als bij de berekening bij dynamische belasting worden gebruikt, zullen nu voor de statische belasting worden samengevat. Een bepaalde statisch opgewekte vervorming in de belastingspunten van een constructie leidt tot vervorming van de constructie-elementen en van de verbindingen tussen de elementen. De weerstand tegen vervorming is voor de elementen en voor de verbindingen een functie van de vervorming, welke functie wordt bepaald door de wijze van vervormen (rekken, buigen, enz.), door de vorm en door de eigenschappen van het materiaal. De eigenschappen van het materiaal worden vastgelegd in belastings-vervormingsdiagrammen, waarvan het statische technische spannings-rekdiagram veruit het meest belangrijke is. De reksnelheden liggen bij het bepalen van het statische spannings-rekdiagram in de orde van

grootte van $10^{-3}\%$ /sec, met een maximum van $10^{-1}\%$ /sec. De weerstand van een element tegen statische vervorming is met behulp van eenvoudige vormveranderingsvergelijkingen uit het spannings-rekdiagram met goede nauwkeurigheid te berekenen (8, 9, 10).

De weerstands-vervormingsfuncties voor de verbindingen zijn in het algemeen moeilijk te berekenen. Voor enkele types verbindingen zijn empirische betrekkingen opgesteld (11). De statische vervorming in de belastingspunten veroorzaakt zodanige vervormingen in de constructie, dat de resulterende weerstand in de belastingspunten gelijk van grootte en tegengesteld van richting is aan de belasting, die de vervorming veroorzaakte.

Constructie-elementen, welke of geheel van staal zijn vervaardigd of waarin staal een essentiële bijdrage aan de weerstand moet leveren, hebben weerstands-vervormingsfuncties, waarin de weerstand tot een bepaalde vervorming elastisch en vrijwel lineair met de vervorming toeneemt, terwijl boven deze vervorming de weerstand of belangrijk minder of geheel niet toeneemt of zelfs afneemt met toenemende vervorming, terwijl een belangrijk deel van de vervorming in dit gebied blijvend is.

Voor het blijvend bruikbaar houden van statisch belaste constructies moet ervoor worden gezorgd, dat grote blijvende vervormingen niet kunnen optreden. Daarvoor worden de elementen zodanig gedimensioneerd, dat de voor het ontwerp maatgevende extreme waarden van de belasting vervormingen opwekken, die zover beneden de elastische grenswaarden van de vervormingen blijven, dat de kans, dat door het overschrijden van de ontwerp-belasting en het lager zijn van de elastische weerstand dan die waarmee gerekend werd belangrijk blijvende vervormingen zullen optreden, zeer gering wordt. Het meest frequent komt het statisch belasten van een constructie voor. De kans, dat een dynamische belasting met een voor een bepaalde constructie catastrofale intensiteit binnen de levensduur voorkomt, is in het algemeen klein. Constructies worden dan ook slechts in enkele speciale gevallen berekend voor het weerstaan van catastrofale dynamische belastingen. Berekeningen en onderzoeken naar het effect van mogelijke dynamische belastingen op voor statische belastingen ontworpen constructies hebben ten doel na te gaan, welke maatregelen zonder belangrijke kostenverhogingen kunnen worden genomen om een catastrofe te voorkomen of minder groot te doen zijn. Als de catastrofe kan worden beschouwd, ofwel het onbruikbaar worden van de constructie door het ontstaan van grote blijvende vervormingen, ofwel de totale verwoesting van de constructie.

Onder een dynamische belasting wordt verstaan een belasting, die zodanig met de tijd varieert, dat de veroorzaakte vervormingen in de constructie zo grote versnellingen van de eigenmassa's van de constructie te weeg brengen, dat de traagheidskrachten ten opzichte van de overige belastingen niet mogen worden verwaarloosd. Er bestaat dan op ieder moment evenwicht tussen de belasting en de som van de traagheidskrachten en de weerstand. Constructies zijn daarbij te beschouwen als veelvoudige massaveersystemen. Aan de wijze, waarop de respons van zo'n systeem op een dynamische belasting wordt berekend, wordt in het theorieverslag van deze afstudeeropdracht nadere aandacht besteed. Voor de civiele constructies liggen de laagste eigenperioden tussen 0,3 sec en 2,5 sec. (16). De dynamische vervormingen zijn zolang de vervormingen elastisch blijven steeds groter dan de vervormingen door het statisch aanbrengen van het maximum van de dynamische belasting. Naarmate de tijd waarin de dynamische belasting varieert dichterbij een van de eigenperiodes van de constructies ligt wordt de dynamische vervorming groter ten opzichte van de statische.

Het verschil tussen een statische en een dynamische belasting kan tot uitdrukking komen in:

1. Bij dynamische belasting is er een zodanige variatie van de belasting met de tijd, dat traagheidskrachten een rol gaan spelen. De variatie met de tijd kan zeer verschillend zijn afhankelijk van de oorzaak van de belasting.

Zo zijn mogelijk:

- a. Periodieke of semi-periodieke variatie met grote of kleine periode. Tot deze groep behoren windbelastingen, aardbevingen, golfbewegingen bij constructies in het water, enz. Bij deze belastingen zijn vooral resonantie-verschijnselen belangrijk.
- b. Belastingen, die snel (in de tijd van enkele miliseconden à enkele seconden) oplopen naar een extreme waarde en al dan niet enige tijd constant blijven voor ze weer afnemen. Hiertoe behoren belastingen door luchtschokken van zware explosies, golfslag, enz. Bij deze belastingen bewegen de constructies nog in hun geheel.
- c. Stootbelastingen. Hierbij bereikt de belasting in de tijd van enkele microseconden zijn maximum en blijft meestal slechts enkele miliseconden op deze maximum waarde. Stootbelastingen kunnen worden veroorzaakt door botsen van vaste lichamen, explosies in springstoffen op vaste stoffen aangebracht, waterslag, enz. Bij deze belastingen ontstaan de vervormingen eerst slechts ter plaatse van de belasting en breiden zich vervolgens met een zekere snelheid over een groter gebied uit.

2. Veel dynamische belastingen zijn horizontaal gericht in tegenstelling tot de statische belastingen, die in hoofdzaak verticaal gericht zijn.
3. De materiaaleigenschappen kunnen veranderen, wanneer door de dynamische belasting belangrijk hogere vervormingssnelheden dan de statische worden veroorzaakt. Vooral constructie-staal is gevoelig voor de grootte van de vervormingssnelheid. De grootste vervormingssnelheden worden bereikt bij stootbelastingen. De afwijkingen van de statische eigenschappen zijn bij deze belastingen dan ook het meest uitgesproken.
(1, 4, 7).

De onderzoeken van de dynamische materiaal-eigenschappen, welke in dit verslag ter sprake komen, hebben betrekkingen op snelle belastingen van staal, zoals die onder andere voorkomen bij aardbevingen en zware explosies (13, 14, 16, 17).

Aardbevingen komen zeer waarschijnlijk niet boven een zekere maximale intensiteit voor, welke voor goed ontworpen constructies niet catastrofaal is. (16). Zware explosies, welke binnen een zekere afstand, afhankelijk van de zwaarte van de explosie, van de constructie plaats hebben, hebben wel een catastrofale uitwerking (16, 17).

Voor het bepalen van de kans, dat een explosie catastrofaal is, moet de dynamische weerstand bekend zijn. De dynamische weerstand bij een vervorming van de belastingspunten wordt op soortgelijke wijze als bij statische vervormingen uit de weerstands-vervormingsfuncties van de elementen en de verbindingen bepaald (11). In deze gevallen is zowel de weerstand bij elastische als bij blijvende vervormingen van belang (13). Als grondslag hiervoor dient het dynamische spannings-rekgedrag van het materiaal, in casu staal, te worden onderzocht, terwijl vervolgens dient te worden nagegaan op welke wijze het dynamische spannings-rekgedrag tot uitdrukking komt in de dynamische weerstands-vervormingsfuncties.

In dit verslag zal het onderzoek worden besproken van snel op buiging belaste prismatische staven van een normaal constructie-staal, die tot grote blijvende vervormingen zijn belast. Van het dynamische materiaal-gedrag kan bij deze proeven alleen de vloeipuntsverhoging worden vastgesteld, van de dynamische weerstand kan de waarde tot grote vervormingen worden bepaald. De resultaten van de proeven zijn door storende effecten in de belastings-apparatuur en door beperkte instrumentatie niet bijzonder nauwkeurig. Ter vergelijking en ter verklaring van de verkregen meetresultaten zijn daarom in dit hoofdstuk enige belangrijke resultaten van elders verrichte onderzoeken op dit gebied opgenomen.

1.2 Vloeipuntsverhoging, vloeivertraging en reksnelheid bij het uitvloeien.

De verschijnselen vloeipuntsverhoging, vloeivertraging en reksnelheid bij het uitvloeien zijn alleen geconstateerd bij materialen met een discontinu statisch spannings-rekdiagram, waartoe vooral de normale constructiestalen behoren.

In de geraadpleegde literatuur wordt alleen vermeld, dat een voorspelling van de dynamische materiaaleigenschappen op grond van de materiaalsamenstelling, de ondergane warmtebehandeling en het statische spannings-rekdiagram niet mogelijk is gebleken (8). De eigenschappen zullen daarom voor ieder constructiestaal apart moeten worden bepaald, waarbij steeds door opgave van de materiaalsamenstelling en de statische eigenschappen van het materiaal zal moeten worden aangegeven op welk materiaal de onderzoeken betrekking hebben.

Voor de elasticiteitsmodulus van staal is gevonden, dat deze niet door de reksnelheid in het gebied, dat hier van belang is, te weten $5 \cdot 10^{-4} \% / \text{sec} < \frac{\partial \epsilon}{\partial t} < 20 \% / \text{sec}$, wordt beïnvloed (8). Evenals bij de statische spannings-rekdiagrammen wordt ook bij de dynamische spannings-rekdiagrammen de spanning aangegeven als de belasting betrokken op de oorspronkelijke doorsnede en wordt de rek aangegeven als de gemiddelde verlenging van een meetlengte betrokken op de oorspronkelijke lengte van die meetlengte. (Het technische dynamische spannings-rekdiagram).

Aangezien bij deze materiaalproeven dunne proefstaven aan één einde snel gerekt worden, terwijl de kracht aan het andere einde wordt gemeten, breiden zich vanuit het einde, waar de belasting wordt aangebracht, spanningsgolven in de staaf uit. Bij proeven met stootbelastingen zijn deze golven er oorzaak van, dat het gemeten krachtverloop aan het vaste einde van de staaf niet meer representatief is voor de in de staaf optredende spanningen (4). De spanningsgolven breiden zich echter zo snel uit, dat in het hier beschouwde gebied van reksnelheden de spanning aan het belaste staaf-einde in de tijd, dat een spanningsfront van bepaalde intensiteit vanuit het belaste einde na terugkaatsing aan het vaste staaf-einde weer bij het belaste einde is teruggekeerd, nog zeer weinig is toegenomen. Het effect van het uitbreiden van spanningsgolven is bij korte proefstaven dan ook verwaarloosbaar, zodat de gemeten kracht aan het vaste einde van de proefstaaf inderdaad representatief is voor de werkelijke spanningen in de staaf.

Uit in (3) beschreven proeven op staal met 0,02% koolstof is gebleken, dat de plastische vervorming bij lage reksnelheden in de orde van $\partial \epsilon / \partial t = 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-1} \%$ /sec zich uitbreiden in de vorm van plastisch werkzame gebieden, die zich in de staaf voortplanten. Bij reksnelheden van ongeveer 10%/sec blijken echter op een groot aantal plaatsen, willekeurig verdeeld over het vloeiende deel van de proefstaaf, plastisch werkzame gebieden te ontstaan. Vooral bij de hogere reksnelheden is het vloeigedrag dus gelijkmatiger over het materiaal verdeeld en is het bepalen van een gemiddelde rek dus meer verantwoord dan bij lage reksnelheden.

De beschikbare proefresultaten hebben steeds betrekking op de zogenaamde technische rekken en spanningen.

Proeven ter bepaling van de invloed van de reksnelheid op het gedrag van het materiaal zijn op twee principiële verschillende wijzen uitgevoerd. Bij de in (3) beschreven proeven worden de spankoppes van de trekbank met constante snelheid van elkaar verwijderd met behulp van een schroefspindel met regelbare rotatiesnelheid. Hierbij ontstaat een belastingswijze, die sterk overeenkomt met die welke voor statische materiaalproeven met hydraulische trekbanken wordt toegepast.

De proeven in (5, 6, 7) en (8, 9, 10, 11) zijn uitgevoerd met toestellen, waarbij een met behulp van samengeperste gassen opgewekte belasting met een niet geheel constante snelheid in een regelbare tijd tussen 5 milliseconden en enkele seconden van nul naar een van te voren vast te stellen constant niveau kan worden gevoerd. In (12) is een beschrijving gegeven van een dergelijke machine, welke gebruikt werd voor de proeven, die in (8, 9, 10, 11) vermeld zijn. De proeven van (5, 6, 7) zijn met een andere beproevingsapparatuur uitgevoerd, waarvan echter het opgewekte belasting-tijddiagram niet in belangrijke mate afwijkt, van dat verkregen met de in (12) beschreven apparatuur.

In fig. 1 (blz. A-1) zijn de resultaten weergegeven van trekproeven met verschillende constante reksnelheden op staal met 0,02% koolstof (3). De in de figuur vermelde reksnelheden zijn herleid uit de opgegeven snelheden van de spankoppes ten opzichte van elkaar, rekening houdend met de verschillende reksnelheden voor de delen van de proefstaven. Uit fig. 1 blijkt:

1. Bij toenemende reksnelheden blijft het vermogen tot vloeien behouden.
2. De spanning, waarbij het vloeien inzet, wordt hoger bij toenemende reksnelheid.
3. De rek na het vloeien is bij een bepaalde verhoogde vloeispanning gelijk aan de rek, welke door eenzelfde spanning "statistisch" zou worden veroorzaakt.

Van het effect van de reksnelheid op de grootte van de vloeispanning geeft fig. 2 (blz. A-1) een beeld (16). In fig. 2 zijn naast de waarden voor normale constructiestalen ook de resultaten van fig. 1 opgenomen. Bij het bezien van fig. 2 moet in gedachten worden gehouden, dat het daar gaat om proeven met staven, welke met een constante snelheid zolang worden gerekt tot een spanning is bereikt, waarbij vloeï onmiddellijk optreedt. Behalve de vloeispanning is ook de breukspanning afhankelijk van de reksnelheid. In fig. 3 (blz. A-1) is een schets gegeven van de invloed van de reksnelheid op beide verschijnselen (7). Reksnelheden in de orde van $10^4\%$ /sec worden met slagproeven opgewekt. Bij deze slagproeven blijkt een kritische slagsnelheid te bestaan, waarboven onmiddellijk breuk optreedt nabij het aangeslagen einde van een trekproefstaaf. Van belang is vooral, dat bij proeven bij kamertemperatuur de breuken zelfs bij zeer hoge reksnelheden nog taai blijken te zijn, zodat voorafgaande aan de breuk nog een aanzienlijke plastische vervorming optreedt en het materiaal nog een belangrijke hoeveelheid vormveranderingsarbeid kan opnemen.

Het merendeel van de beschikbare gegevens is verkregen uit proeven waarin de belasting snel tot een gewenste hoogte is opgevoerd en daarna constant is gehouden. Alle gegevens die in dit verslag zijn opgenomen hebben betrekking op proeven bij kamertemperatuur. In (6) worden de resultaten van dergelijke proeven op eenzelfde materiaal bij verschillende constante temperaturen, zowel hoger, als gelijk, als lager dan de kamertemperatuur, vermeld. Het blijkt, dat de temperatuur op de verschijnselen, die bij dit type proeven optreden een belangrijke invloed heeft. Een mathematische beschrijving van de invloed van de temperatuur is op grond van deze proeven niet mogelijk gebleken.

Het merendeel van deze proeven is uitgevoerd met belastingen, die in 5 à 10 millisecon van nul naar een zodanige maximum waarde zijn opgevoerd, dat de opgewekte constante maximum spanning waarden bereikte, liggend tussen de bovenste vloeigrens en de maximum spanning van het statische spanningsrekdiagram. De reksnelheden in het elastische gebied liggen daarbij tussen 10% /sec en 36% /sec.

Enkele van deze proeven zijn uitgevoerd met oplooptijden van de belasting liggend tussen 0,08 en 0,20 sec. resp. 0,26 en 0,80 sec, overeenkomend met reksnelheden in het elastische gebied van 0,2 en $2,2\%$ /sec resp. 1,2 en $7,0\%$ /sec.

Zoals reeds eerder werd opgemerkt wordt het elastische gedrag niet door de grootte van de reksnelheid beïnvloed. Eveneens is er in het beschouwde gebied van de reksnelheden weinig invloed op de maximum spanning geconstateerd (8). Zie ook fig. 3 (blz. A-1).

De invloed van het snel belasten tot een constante spanning komt tot uitdrukking in twee effecten:

1. Het materiaal blijft tijdens het toenemen van de spanning elastisch. Pas wanneer de opgebrachte spanning gedurende een zekere tijd op de constante waarde is gebleven begint de rek weer toe te nemen en treedt vloeien op. Dit verschijnsel wordt aangeduid met vloeivertraging.
2. De reksnelheid, welke optreedt op het moment, dat het vloeien (reksnelheid bij het uitvloeien) begint is afhankelijk van de grootte van de opgebrachte constante spanning.

In fig. 5 (blz. A-2) is het resultaat van een serie proeven met een belastingsoplooptijd van 6 millisecon weergegeven in de vorm van spannings-rek-diagrammen en rek-tijddiagrammen. De figuur is overgenomen uit (8) en heeft betrekking op het materiaal 1 van tabel 1 (blz. A-30).

De bovengenoemde effecten komen in de figuur duidelijk tot uitdrukking. Naast de diagrammen voor de snel opgebrachte spanningen is met een stip-pellijn het resultaat van een statische trekproef weergegeven. Waarden, die aan statische materiaalproeven zijn ontleend zullen in het vervolg van een x worden voorzien. Ook hier blijkt weer, dat de spannings-rek-krommen na het uitvloeien steeds weer samenvallen met de statische trek-krommen. De invloed van de hogere reksnelheid blijft beperkt tot het vloeigebied.

In het rek-tijddiagram is voor de verschillende krommen de grootte van de vloeivertraging aangegeven. Voor de vloeivertraging worden twee verschillende definities gebruikt. In de literatuur (7, 8, 9, 10, 11) wordt de vloeiverhoging gedefinieerd als de tijd, welke verloopt tussen het bereiken van de statische bovenste vloeigrens en het bereiken van een zodanige rek, dat $\sigma/\epsilon = 1,4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. In fig. 5 (blz. A-2) zijn in het rek-tijddiagram deze waarden van de rekken aangegeven en is vervolgens de grootte van de vloeivertraging volgens de hier gegeven definitie aangegeven. In de literatuur (5, 6, 7) wordt de vloeivertraging gedefinieerd als de tijd, welke verloopt tussen het bereiken van het constante maximum van de snel opgebrachte spanning en het begin van het uitvloeien. Deze laatste definitie levert, zoals in fig. 5 eenvoudig is na te gaan, lagere waarden voor de vloeivertraging dan de eerste definitie.

Uit figuur 5 blijkt verder, dat hoe hoger de snel opgebrachte spanning is des te geringer is de vloeivertraging. Teruggrijpend op fig. 1 kan daarvan nog worden gezegd, dat de in fig. 1 gevonden waarden voor de vloeigrens bij verschillende reksnelheden spanningen zijn, waarbij geen vloeivertraging meer optreedt.

Fig. 4 (blz. A-1) geeft het verband aan tussen de grootten van de snel opgebrachte spanningen en de bijbehorende vloeivertragingen t_{vv} , zoals deze zijn opgegeven in (6). Deze grafiek is opgenomen, omdat alleen bij dit onderzoek een groot aantal proeven op hetzelfde materiaal en onder dezelfde omstandigheden werden verricht, zodat dit de enige gegevens zijn, die het mogelijk maken een algemene wetmatigheid voor dit verschijnsel vast te stellen. De grafieken van figuur 6, die voor de in (8) beschreven proeven het verband tussen vloeivertraging en spanning weergeven, zijn steeds geconstrueerd op reeksen van 5 à 7 waarnemingen per materiaal. Bij fig. 4 kan worden opgemerkt, dat bij een reksnelheid van willekeurige grootte de vloeivertraging behorende bij spanningen gelijk aan de statische bovenste vloeigrens, met een zeker minimum een verder onbepaalde duur kan hebben, veroorzaakt door de labiele toestand waarin het materiaal bij die spanning verkeert. Bij het uitzetten van de vloeivertraging op log. schaal wordt het verband tussen de snel opgebrachte spanning en de bijbehorende vloeivertraging het best weergegeven met een rechte lijn, zodat het gehele diagram wordt gevormd door twee rechte takken.

In figuur 6 (blz. A-3) is het verband tussen de vloeivertraging en de opgebrachte spanning voor enkele in tabel 1 (blz. A-30) nader omschreven materialen uitgezet. Ter vergelijking zijn de resultaten van fig. 4 eveneens in fig. 6 opgenomen, waarbij in gedachten moet worden gehouden, dat de vloeivertragingen van deze kromme door een andere definitie lager zijn dan die van de overige krommen van fig. 6.

Van enkele hieronder genoemde factoren is in (8) de invloed op de vloeivertraging onderzocht.

1. Onderzocht is het verschil in vloeivertraging tussen glad gepolijste staven en staven met één opzettelijke kerf met een diepte van 0,25 mm. De resultaten van de beperkte series wijzen erop, dat kerven loodrecht op de richting van de hoofdspanning weinig of geen invloed hebben op de vloeivertraging.

2. Zoals reeds eerder vermeld is, werden op enige materialen proeven met belastingsoplooptijden van 5 msec, 100 msec en 500 msec verricht. Ook in dit geval waren de series van beperkte omvang. De invloed van de variatie in de reksnelheid binnen de aangegeven grenzen was voor de verschillende materialen verschillend, maar in alle gevallen zeer gering.
3. Op enige materialen zijn zowel trek- als drukproeven verricht. In het algemeen bleek het gedrag bij trek en druk zowel wat betreft de vloeivertraging als wat betreft de hierna te bespreken reksnelheid bij het uitvloeien gelijk te zijn.
4. Materiaal, dat in één richting statisch tot vloeien is gebracht volgt een vervorming in tegengestelde richting vrijwel vanaf het begin niet meer lineair. Dit heet het Bauschinger effect. In (8) is met enkele proeven geconstateerd, dat een soort Bauschinger effect ook bij snel opgebrachte belastingen voorkomt. Het komt dan tot uitdrukking, doordat een materiaal, dat onder invloed van een snel opgebrachte constante spanning in één richting heeft gevloeid het ontlasten nog wel lineair volgt, maar bij een daarop volgende snel opgebrachte belasting in de tegengestelde richting een continu toenemende rek zonder vloeivertraging vertoont. Is door de eerste belasting geen vloeiveroorzaakt, dan treedt na het ontlasten en het snel belasten in tegengestelde richting wel vloeivertraging op, welke even groot is als wanneer het materiaal geen voorafgaande belasting in tegengestelde richting heeft ondergaan.

Tenslotte dienen nog de proeven vermeld te worden, waarbij de snel tot een constante spanning, hoger dan de statische bovenste vloeigrens, gebrachte staven na een tijd $t_1 < t_{vv}$ (vloeivertraging) snel werden ontlast. Het nogmaals snel belasten tot dezelfde constante spanning veroorzaakt dan een vloeivertraging t'_{vv} , zodanig, dat $t_1 + t'_{vv} = t_{vv}$. Dit geldt voor vloeivertragingen, die worden gemeten vanaf het moment, dat de opgebrachte spanning zijn constante waarde bereikt tot het moment, dat het materiaal begint te vloeien.

De reksnelheid, waarmee het vertraagde vloeien bij de snel opgebrachte constante spanning inzet, blijkt eveneens afhankelijk te zijn van de grootte van de opgebrachte spanning. Bij alle proeven van dit type werden

zowel de vloeivertraging als de reksnelheid bij het uitvloeien bepaald. In figuur 7 (blz. A-4) is voor het materiaal 7 van tabel 1 het verband tussen de spanning bij het begin van het vloeien en de reksnelheid op dat moment uitgezet. Evenals bij fig. 4 voor de vloeivertraging werd opgemerkt, geldt ook hier, dat dit de enig beschikbare serie gegevens van proeven op eenzelfde materiaal van voldoende omvang is, om betrouwbare conclusies te kunnen trekken. Het blijkt echter, dat de waargenomen waarden een zo grote spreiding vertonen, dat de waarnemers van deze gegevens daaraan geen definitieve conclusies konden verbinden (5). Om te kunnen vergelijken met andere waarnemingen is door de meetpunten van fig. 7 op het oog een zo goed mogelijk kloppende rechte getrokken.

In fig. 8 (blz. A-4) is het verband tussen de reksnelheid bij het uitvloeien en de laagste waarde die de spanning tijdens het uitvloeien bereikte weergegeven, zoals dit in (8) is opgegeven. Weer moet daarbij in het oog worden gehouden, dat deze grafieken werden bepaald aan de hand van een beperkt aantal waarnemingen per materiaal. Verder dient nog te worden opgemerkt, dat het vergelijken van de uit fig. 7 afgeleide grafiek voor het materiaal 7 van tabel 1 met de overige grafieken van fig. 8 behoudens de onzekerheid over de juistheid van de rechte, die uit de punten van fig. 7 werd geconstrueerd, mogelijk is, omdat hier in tegenstelling met de waarnemingen van vloeivertragingen steeds de grootheden volgens dezelfde definities werden gemeten.

1.3 De ontwikkeling van dynamische plastische scharnieren.

De in 1.2 besproken dynamische materiaal-eigenschappen kunnen direct bij de berekening van dynamisch belaste vakwerken worden gebruikt. Draagconstructies van gebouwen zijn meestal framewerken, die uit op buiging of op buiging en druk belaste elementen zijn opgebouwd. Vakwerken vormen, indien ze in deze frames voorkomen, in het algemeen slechts een gedeelte van het frame.

In het volgende zal het bepalen van de weerstands-vervormingsfunctie van snel zuiver gebogen elementen worden besproken. Het blijkt, dat de weerstand tegen snelle belasting op buiging tot in het gebied van de blijvende vervormingen met redelijke nauwkeurigheid uit de in 1.2 besproken dynamische materiaal-eigenschappen kan worden voorspeld. De techniek, die hiervoor in (8) is aangegeven, zal hier worden besproken, omdat het in de

bedoeling ligt hiervan bij de verklaring van de verrichte proeven gebruik te maken. Tevens zullen hier de resultaten van enige in (8) beschreven snelle buigproeven worden weergegeven, daar deze proeven werden verricht op proefstaven, waarvan de vorm en afmetingen weinig afwijken van de proefstaven, welke bij de in dit verslag beschreven proeven werden gebruikt. De afwijking tussen de proeven in dit verslag besproken en die welke in (8) worden vermeld, bestaat daarin, dat hier werd gewerkt met belastingen, die onmiddellijk na het bereiken van hun maximum waarde weer naar nul afnamen, terwijl in (8) de snel opgebrachte buigingsbelasting na het bereiken van zijn maximum constant werd gehouden. Aangezien echter in beide gevallen in het gebied van de zuivere buiging een continu toenemende kromming werd geconstateerd, mag worden aangenomen, dat deze afwijking niet van grote betekenis is.

Een ander punt van belang is, dat voor het bepalen van de weerstand tegen buiging, gebruik wordt gemaakt van de begrippen vloeivertraging en reksnelheid, zoals deze zijn bepaald met proeven, waarbij de rek gedurende een zekere tijd niet toeneemt, terwijl bij buigproeven steeds een continue toename van de kromming en dus ook van de rek in het gebied van de zuivere buiging werd waargenomen.

Het vergelijken van de vloeispanningen, welke bij constante reksnelheden werden bepaald (fig. 2 blz. A-1), en de reksnelheden bij het uitvloeien onder snel opgebrachte constante spanningen (fig. 8 blz. A-4) doet zien, dat er zoveel overeenkomst tussen deze op verschillende wijze bepaalde grafieken bestaat, dat het gebruiken van de onder constante spanning bepaalde vloeisnelheden tot goede resultaten moet kunnen leiden.

De hier beschreven techniek gaat ervan uit, dat het krommingsverloop ter plaatse van het plastische scharnier bekend is. Voor het berekenen van het bij een bepaalde kromming behorend moment in de doorsnede worden de volgende aannamen gedaan:

1. De rek van de vezels neemt lineair met de afstand tot de neutrale lijn toe.
2. Het gedrag van het materiaal is voor trek- en drukbelastingen gelijk.
3. Het gedrag van het materiaal onder zuivere trekspanning is representatief voor het gedrag van het materiaal bij buiging, waarbij in de naast liggende vezels van de in de beschouwde vezel afwijkende spanningen heersen.
4. De materiaal-eigenschappen bepaald onder snel opgebrachte constante zuivere trek- en drukspanningen zijn ook toepasbaar voor de wijze, waarop de spanning in de vezels van de gebogen staaf varieert.

Uit het gemeten krommingsverloop in de onderzochte doorsnede kan nu voor een aantal vezels op verschillende afstanden van de neutrale lijn het rekverloop worden bepaald. In fig. 9a (blz. A-5) is het rekverloop van een vezel uitgezet. Op de rekkromme is het punt aangegeven, waarvan de rek overeenkomt met die van de statische bovenste vloeigrens. In fig. 6 (blz. A-3) is de vloeivertraging t_{vv} uitgezet tegen de opgebrachte spanning, waarbij de vloeivertraging werd gemeten vanaf het moment, dat de statische bovenste vloeigrens werd bereikt tot aan het moment, dat de rek zodanig was toegenomen, dat $\sigma/\epsilon = 1,4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. Evenzo kunnen krommen worden opgesteld, die de tijd aangeven, die verloopt tot het bereiken van een rek, zodanig, dat $\sigma/\epsilon = 2,1 \times 10^6$ en $\sigma/\epsilon = 1,75 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. Het is duidelijk, dat uit ieder van deze vloeivertragingkrommen voor het materiaal ook de kromme kan worden bepaald, die het verband van t_{vv} met de grootte van de rek aan het einde van het vertragingstraject weergeeft. In fig. 9a (blz. A-5) zijn voor de drie genoemde waarden van σ/ϵ deze krommen uitgezet, vanaf het moment, dat de rek in de onderzochte vezel gelijk was aan die behorend bij de statische bovenste vloeigrens. Voor de snijpunten van deze krommen met die van het rekverloop zijn nu uit de bijbehorende waarden van σ/ϵ en van de rek de spanningen te bepalen. In fig. 9b (blz. A-5), is het aldus bepaalde spanningsverloop voor de onderzochte vezel tot op het moment, dat $\sigma/\epsilon \leq 1,4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ wordt, aangegeven. Voor het verdere verloop van de rekkromme voor de vezel kan dan worden gesteld, dat het materiaal aan het uitvloeien is, waarbij de spanning waarbij dat plaats vindt direct samenhangt met de heersende reksnelheid. Krommen, die het verband tussen de reksnelheid bij uitvloeien en de spanning waarbij dit plaats vindt aangeven, zijn in fig. 8 (blz. A-4) voor verschillende materialen weergegeven. Voor de overzichtelijkheid is in fig. 9c (blz. A-5) een dergelijke kromme voor het materiaal, waarop fig. 9 betrekking heeft opgenomen.

Uit fig. 9a (blz. A-5) kan nu voor de verschillende tijdstippen de grootte van de reksnelheden worden opgemeten, waarna uit fig. 9c (blz. A-5) de grootte van de spanning op de overeenkomstige tijdstippen kan worden afgelezen. Op deze wijze is voor alle beschouwde vezels uit het rekverloop in die vezels het spanningsverloop te construeren. Met behulp van deze krommen voor het spanningsverloop kan nu voor verschillende tijdstippen het spanningsdiagram voor de doorsnede worden bepaald, waarbij het buigende moment direct kan worden berekend. Uit het aldus bepaalde momentenverloop en het gemeten krommingsverloop kan nu het dynamische $M-\chi$ diagram worden vastgesteld.

Uit het gemeten krommingsverloop in de onderzochte doorsnede kan nu voor een aantal vezels op verschillende afstanden van de neutrale lijn het rekverloop worden bepaald. In fig. 9a (blz. A-5) is het rekverloop van een vezel uitgezet. Op de rekkromme is het punt aangegeven, waarvan de rek overeenkomt met die van de statische bovenste vloeigrens. In fig. 6 (blz. A-3) is de vloeivertraging t_{vv} uitgezet tegen de opgebrachte spanning, waarbij de vloeivertraging werd gemeten vanaf het moment, dat de statische bovenste vloeigrens werd bereikt tot aan het moment, dat de rek zodanig was toegenomen, dat $\sigma/\epsilon = 1,4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. Evenzo kunnen krommen worden opgesteld, die de tijd aangeven, die verloopt tot het bereiken van een rek, zodanig, dat $\sigma/\epsilon = 2,1 \times 10^6$ en $\sigma/\epsilon = 1,75 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. Het is duidelijk, dat uit ieder van deze vloeivertragingkrommen voor het materiaal ook de kromme kan worden bepaald, die het verband van t_{vv} met de grootte van de rek aan het einde van het vertragingstraject weergeeft. In fig. 9a (blz. A-5) zijn voor de drie genoemde waarden van σ/ϵ deze krommen uitgezet, vanaf het moment, dat de rek in de onderzochte vezel gelijk was aan die behorend bij de statische bovenste vloeigrens. Voor de snijpunten van deze krommen met die van het rekverloop zijn nu uit de bijbehorende waarden van σ/ϵ en van de rek de spanningen te bepalen. In fig. 9b (blz. A-5), is het aldus bepaalde spanningsverloop voor de onderzochte vezel tot op het moment, dat $\sigma/\epsilon \leq 1,4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ wordt, aangegeven. Voor het verdere verloop van de rekkromme voor de vezel kan dan worden gesteld, dat het materiaal aan het uitvloeien is, waarbij de spanning waarbij dat plaats vindt direct samenhangt met de heersende reksnelheid. Krommen, die het verband tussen de reksnelheid bij uitvloeien en de spanning waarbij dit plaats vindt aangeven, zijn in fig. 8 (blz. A-4) voor verschillende materialen weergegeven. Voor de overzichtelijkheid is in fig. 9c (blz. A-5) een dergelijke kromme voor het materiaal, waarop fig. 9 betrekking heeft opgenomen.

Uit fig. 9a (blz. A-5) kan nu voor de verschillende tijdstippen de grootte van de reksnelheden worden opgemeten, waarna uit fig. 9c (blz. A-5) de grootte van de spanning op de overeenkomstige tijdstippen kan worden afgelezen. Op deze wijze is voor alle beschouwde vezels uit het rekverloop in die vezels het spanningsverloop te construeren. Met behulp van deze krommen voor het spanningsverloop kan nu voor verschillende tijdstippen het spanningsdiagram voor de doorsnede worden bepaald, waarbij het buigende moment direct kan worden berekend. Uit het aldus bepaalde momentenverloop en het gemeten krommingsverloop kan nu het dynamische M- χ diagram worden vastgesteld.

De juistheid van de hiervoor beschreven wijze van de ontwikkeling van het dynamische plastische moment is in (8) nagegaan door dit te vergelijken met de resultaten van snelle buigproeven, waarbij de belasting, in ongeveer 8 millisecon naar een constante waarde is opgevoerd en vervolgens constant is gehouden tot het vloeien was beëindigd. De hier weergegeven resultaten zijn verkregen voor gekalmeerd A.S.T.M. A7 staal (St 44), op proefstaven uit plaatstaal, welke in de volgorde zagen, schaven, vijlen en polijsten zijn bewerkt tot prismatische staven met een doorsnede van $50,8 \times 16,9$ mm en een overspanning van 508 mm. De proefstaven waren aan beide zijden op rollen opgelegd en werden in twee punten op $\frac{1}{3}L$ van de opleggingen belast. Voor het gebruikte materiaal zijn de dynamische eigenschappen in zuivere snelle trekproeven tot constante spanningen bepaald. Met deze gegevens is de berekening van het plastische momentenverloop uitgevoerd door het spanningsverloop in 6 punten van de halve staafhoogte te berekenen. Het krommingsverloop in het gebied van de zuivere buiging is gemeten met rekstrookjes op de uiterste vezels voor het elastische gebied en met een extern aangebrachte krommingsmeter voor het plastische gebied. De opgebrachte belasting is met een dynamometer gemeten. De massakrachten in de belastingspunten konden niet worden vastgesteld, zodat moest worden aangenomen, dat de weerstand van de staaf in de belastingspunten gelijk was aan de gemeten dynamische belasting, hetgeen naar schatting voor deze proeven een fout van 2% in de weerstandskracht veroorzaakt. Uit deze weerstandskrachten is het moment in het gebied van de zuivere buiging berekend, waarbij er bij de grote vervormingen een correctie in rekening is gebracht voor de invloed van de geometrie van de opstelling op de grootte van het moment.

Van deze proeven geeft fig. 10 (blz. A-6) het gemeten verloop van de opgebrachte belasting weer en fig. 11 (blz. A-7) de gemeten krommingen in het gebied van de zuivere buiging. De fig. 12 (blz. A-8) en 13 (blz. A-9) geven de $M-X$ diagrammen voor de twee staven weer, zoals deze zijn berekend uit de gemeten kromming en resp. de gemeten belasting; het berekende momentenverloop volgens de dynamische materiaal-gegevens van de zuivere trekproef; het berekende momentenverloop uit de in de zuivere trekproef bepaalde gegevens over de reksnelheid bij het uitvloeien alleen. Ter vergelijking is steeds het berekende statische $M-X$ diagram voor de staven in de fig. 12 (blz. A-8) en 13 (blz. A-9) opgenomen.

Op te merken valt nog:

1. Voor één proefstaaf werd het rekverloop op verschillende afstanden van de neutrale lijn gemeten. Het bleek, dat het rekverloop in de verschillende meetpunten zodanig was, dat een lineaire toename van de rek met de afstand tot de neutrale lijn kon worden aangehouden, terwijl de meetonnauwkeurigheden een duidelijker uitspraak onmogelijk maakten.

2. In het vloeitraject van het materiaal is het $M-\chi$ diagram op beide aangegeven manieren met een fout van maximaal 10% uit de dynamische materiaaleigenschappen te voorspellen.

In het verstevigingsgebied is de gemeten staafweerstand hoger dan die, welke uit de vloeigegevens van het materiaal werd bepaald.

3. Als weerstands-vervormingsfuncties van de staaf bij snelle belasting met een geïdealiseerd $M-\chi$ diagram worden berekend kan voor de bepaling van dat geïdealiseerde diagram met een vloeispanning 40% hoger dan de statische onderste vloeispanning worden gerekend.

4. De grootte van de snel opgebrachte constante belasting blijkt geen invloed te hebben op de weerstand van de staaf. Vergelijk fig. 10 (blz. A-6) met de fig. 12 (blz. A-8) en 13 (blz. A-9).

5. Proeven op breedflensbalken van hetzelfde type als de in het voorgaande beschreven proeven op balken met rechthoekige doorsnede geven gelijke resultaten. Voor breedflensbalken kan de weerstand tegen snelle belasting op buiging worden bepaald uit het krommingsverloop en het gemiddelde van de dynamische materiaal-eigenschappen, die voor proefstukken op verschillende plaatsen uit de doorsnede van het profiel genomen in snelle trekproeven tot constante spanningen werden bepaald (9).

2. Doel van het onderzoek en keuze van de te meten waarden.

2.1 Doel en opzet van het onderzoek.

Het doel van het onderzoek is in de eerste plaats het bepalen van de hoogte van de vloeigrens bij verschillende reksnelheden in het elastische gebied voor het Nederlandse constructiestaal Fe 37. met behulp van buigproeven. Oorspronkelijk was als tweede doel gesteld het bepalen van het verband tussen vloeivertraging en de hoogte van de opgebrachte spanning bij verschillende reksnelheden in het elastische gebied.

Zoals blijkt uit het in hoofdstuk 1.3 uiteengezette, zijn buigproeven niet geschikt voor het bepalen van vloeivertragingen en moet voor metingen daarvan met zuivere trek- of drukproeven worden gewerkt.

De opzet van de proeven is het aanbrengen van een massa-veersysteem in het belastingspunt van een buigstaaf, waarbij de massa van het belastingsysteem door een tweede massa moet worden aangestoten. De veerkracht in het aan de proefstaaf bevestigde einde van het belastingsysteem vormt daarbij de dynamische buigende belasting voor de proefstaaf.

Door een verandering van de periode van het belastingsysteem kan in principe een uitgestrekt gebied van reksnelheden in het elastische gebied worden bestreken. De constructie van het beproevingstoestel dient daarbij zodanig te zijn, dat slechts een enkele uiteraard sinusvormige belastingspuls met een regelbaar maximum en een regelbare duur wordt opgewekt. De wijze, waarop dit verwezenlijkt is, zal in hoofdstuk 3 bij de bespreking van het ontwerp van het beproevingstoestel nader worden uiteengezet.

Bij de eerste berekeningen voor de dimensionering van een dergelijk belastingsysteem bleek, dat het niet mogelijk zou zijn in één beproevingstoestel, dat op zuiver mechanische wijze zou moeten werken, de onderdelen zodanig te kunnen variëren, dat het oorspronkelijk gedachte gebied van belastingsoplooptijden, liggend tussen circa 1 milliseconde en enkele seconden te realiseren. Daarom is een verdere beperking noodzakelijk geworden en is tenslotte de keuze bepaald op belastingen, die in circa 10 milliseconden van nul naar hun maximum waarde oplopen. Afwijkingen van de gekozen oplooptijd zijn mogelijk, maar het zal blijken, dat deze afwijkingen in de ontworpen constructie zeer beperkt blijven vooral omdat de onderdelen hanteerbare afmetingen moeten behouden.

De aangegeven waarde van de oplooptijd is gekozen omdat:

1. Het effect van het snel belasten bij een dergelijke oplooptijd goed meetbaar tot uitdrukking komt.
2. Uit de berekeningen voor de dimensionering van het belastingssysteem en de proefstaven was gebleken, dat bij deze oplooptijden proefstaafafmetingen van voldoende grootte worden verkregen om normale rekstrookjes te kunnen aanbrengen en tevens goed hanteerbare afmetingen van het belastingssysteem worden verkregen.
3. Een belangrijk deel van de literatuur-gegevens bij overeenkomstige belastingsoplooptijden is verkregen, zodat vergelijken met elders verkregen resultaten mogelijk wordt.
4. Deze belastingsoplooptijden met reëel voorkomende waarden overeenkomen en wel voornamelijk voor die constructie-elementen, die de directe ondersteuning vormen van de bekledingen van gebouwen belast door de luchtschok van een kernbomexplosie.

Voor de proefstaven zijn prismatische staven van rechthoekige doorsnede gekozen. Daar het in eerste instantie de bedoeling is een dynamische materiaal-eigenschap te weten de vloeipuntsverhoging te bepalen, ligt het voor de hand complicaties tengevolge van de proefstaafvorm door het kiezen van een zo eenvoudig mogelijke staafvorm te vermijden. De staven zijn verder zo gedimensioneerd, dat de eigen frequenties hoog zijn ten opzichte van de frequentie van de belasting. Hierdoor worden storende massakrachten van de proefstaven zelf uit de metingen aan de proefstaaf gehouden. De proefstaven worden in twee punten op gelijke afstanden van het staafmidden belast om a) een zône met zuivere buiging te verkrijgen b) enige ruimte te verkrijgen om in het midden van de proefstaaf rekstrookjes voor het meten van de kromming te kunnen aanbrengen. De twee belastingspunten van de buigproef zijn samen gebracht in een belastingsverdeelblok, dat via een dynamometer met het belastingssysteem is verbonden.

2.2 Te meten grootheden en de wijze van meten.

De keuze van de te meten grootheden en de wijze, waarop deze werden gemeten werd o.a. bepaald door de beschikbare registratie-apparatuur. De verschijnselen, die bij dit type proeven moeten worden gemeten, verlopen zo snel, dat de enige goede registratie-methode bestaat in het

weergegeven van met rekstokjes gemeten grootheden op oscilloscoopschermen en het fotograferen van de beelden van het scherm.

Voor registratie was een dubbelstraals oscilloscoop ter beschikking. Alle metingen bij de dynamische proeven zijn daarmee verricht. Het vergroten van het aantal registratie-mogelijkheden brengt extra complicaties mee en is, omdat nog geen ervaring met deze wijze van registreren was opgedaan, achterwege gelaten.

Beide sporen werden benut voor het registreren van het verloop van de verschijnselen met de tijd. Een poging om X-Y registratie toe te passen voor het meten van een P- δ diagram gaf geen goede resultaten, vermoedelijk veroorzaakt door a) het onregelmatige, niet met de geïdealiseerde sinusvorm overeenkomende, krachtverloop b) de slechte kwaliteit van de gebruikte verplaatsingsmeter, waarvan de meetveren eigen frequenties in dezelfde orde van grootte als het te meten verschijnsel hadden.

Eén van de beschikbare sporen van de oscilloscoop is steeds benut voor de registratie van het krachtverloop in de dynamometer aan het belastingsverdeelblok.

Het tweede spoor is voor verschillende registraties benut. Bij de eigenlijke proeven werd op dit spoor bij een gedeelte van de proefstaven het verloop van de som van de rekken in de bovenste en de onderste vezel in het gebied van de zuivere buiging gemeten.

Bij het resterende gedeelte van de proefstaven werd op dit spoor alleen het rekverloop in de onderste vezel geregistreerd, omdat uit de voorgaande proeven de indruk was verkregen, dat door een niet geheel juiste constructie van het belastingsverdeelblok de neutrale lijn in het gebied van de zuivere buiging naar boven zou zijn verschoven, zodat de rek in de onderste vezel groter zou zijn dan uit de gemiddelde rek onder en boven zou zijn af te leiden.

Behalve voor het registreren van het rekverloop in de zuiver gebogen zone van de proefstaven werd het tweede spoor ook nog benut voor het registreren van a) de weg, welke de massa van het belastingssysteem tijdens een belastingspuls volgde en b) de weg, welke het midden van de proefstaaf tijdens een belastingspuls aflegde.

Met slechts één spoor werd bij het begin van het meten de weg van het stootblok geregistreerd, waarvan echter geen reproduceerbare foto's werden verkregen. In een later stadium werd van een enkel spoor nog

gebruik gemaakt om door middel van het rekverloop van de rekstrookjes op een proefstaaf de eigen frequenties van de proefstaaf alleen en van de proefstaaf met het belastingsverdeelblok gezamenlijk vast te stellen. Bij het opzetten van de proeven werd als criterium voor het vaststellen van de grootte van de vloeispanning bij de gebruikte reksnelheid gekozen het meten van de blijvende rek in de uiterste vezels, welke na een bepaalde maximum rek in de uiterste vezels, die uit het gemeten rekverloop tijdens de belastingspuls bekend is, op dezelfde strookjes kan worden afgelezen met statische rekmeetapparatuur.

Zolang bij een bepaalde maximum-rek in de uiterste vezels geen vloeï is opgetreden zal geen restrek worden gemeten. Daar de elasticiteitsmodulus bij dynamisch belasten gelijk blijft aan die bij statisch belasten kan uit de bekende statische waarde van E en het gemeten maximum van de rek bij dié belastingspuls op een staaf, waarbij voor het laatst geen restrek werd geconstateerd, de waarde van de vloeispanning direct worden bepaald.

Volgens deze methode is echter niet nauwkeurig te meten. De rek in de uiterste vezels van de staaf is representatief voor de kromming van de staafdoorsnede. Deze kromming wordt niet, zoals bij trekproeven de rek, plotseling groter op het moment dat de vloeï in de uiterste vezels begint. Een belastend moment, dat alleen een dunne laag uiterste vezels tot vloeïen brengt, heeft na het elastisch ontlasten (dat volgens de in (8) beschreven proeven inderdaad optreedt) slechts een zeer kleine restkromming veroorzaakt. Deze restkromming, die gemeten wordt met de restrekken van de uiterste vezels, moet zeer nauwkeurig kunnen worden gemeten, wanneer hij als criterium wordt genomen voor het voor het eerst optreden van vloeï. Het vaststellen van kleine restkrommingen blijkt niet voldoende nauwkeurig te kunnen plaats vinden. In hoofdstuk 6 is daarom bij het berekenen van de vloeispanningen een methode gebruikt, waarbij wordt uitgegaan van de restkrommingen, welke optreden als een belangrijk deel van de staafdoorsnede bij het belasten tot vloeïen is gekomen.

3. Constructie van het beproevingsstoestel.

3.1 Beschrijving en werkwijze.

Fig. 14 (blz. A-10) geeft een overzicht van de gehele opstelling, zoals die tijdens de proeven werd gebruikt. In fig. 15 (tekening los achterin) is de langsdoorsnede van de constructie weergegeven.

In fig. 16 (blz. A-10) is de proefstaaf met zijn opleggingen en het belastingsverdeelblok weergegeven. Aan de hand van deze figuren zal nu een beschrijving van de ontworpen beproevingsapparatuur worden gegeven.

De proefstukken zijn prismatische staven met een rechthoekige doorsnede opgelegd op een scharnier en een rol (fig. 16).

De oplegging is met behulp van kogellegers zo ideaal mogelijk gemaakt. De assen van de opleggingen zijn zo dicht mogelijk bij de staafas gebracht door in de proefstaven groeven uit te fraisen, die om de assen passen. In het midden van de proefstaaf zijn de twee belastingspunten aangebracht in de vorm van vaste bussen opgenomen in een belastingsverdeelblok. De afstand van deze bussen is zo groot gekozen, dat in de zone van de zuivere buiging van de proefstaaf rekstrookjes van gebruikelijke afmetingen op de boven- en onderkant van de staaf aangebracht tussen de bussen passen. De afstand is verder zo klein mogelijk gehouden om met een bepaalde kracht een zo hoog mogelijk buigend moment te kunnen verkrijgen.

Op kogels gelagerd is het ene einde van een dynamometer aan het belastingsverdeelblok verbonden. Het andere einde van de dynamometer is met een zelfinstellend kogelleger aan een aan de veer van het belastingssysteem verbonden as bevestigd. De veer van het belastingssysteem is een bladveer, welke aan de trekstang scharnierend is bevestigd en die als tweede oplegging een roloplegging heeft. De scharnierende lagering is door middel van een langsgeleiding naar het frame van de opstelling in horizontale richting gefixeerd. Deze langsgeleiding is zo ontworpen, dat bij het ontstaan van een plastisch scharnier in de proefstaaf geleiding en proefstaaf samen een parallelgeleiding voor de dynamometer vormen, die ervoor zorgt, dat de richting van de op de staaf gebrachte belasting gefixeerd is. (fig. 15).

Op het midden van de bladveer is de massa van het belastingssysteem bevestigd. Deze massa is aan vier zijden door op het frame gemonteerde rollen bij zijn beweging gesteund. De rollen in dwarsrichting steunen op vlak geschaafde kanten van de cirkelvormige massa. In langsrichting zijn speciale

geleidingen op de massa gemonteerd, die zodanig zijn ontworpen, dat de massa alleen in de richting overeenkomend met de eerste orde trilling van het massaveersysteem kan bewegen, waarbij in deze beweging het effect van het doorbuigen van de proefstaaf is ingecalculleerd. Bij de berekening van de vorm van de langsgeleidingen bleek, dat de krommingen daarvan zo gering behoeften te zijn, dat kon worden volstaan met het rechtlijnig afschuiven van de langsgeleidingen. Het frame van de constructie bestaat uit twee langsbalken DIN-16, waarboven twee dwarsbalken DIN-16 voor de opleggingen van de proefstaven zijn aangebracht. Onder de langsbalken zijn dwarsbalken aangebracht ter plaatse van de opleggingen van de proefstaaf en ter plaatse van de roloplegging van de veerstrip.

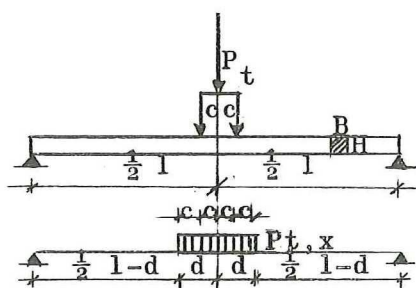
In de onderste dwarsbalken van het frame zijn stelpennen met voetplaten aangebracht, waarmee de gehele opstelling los op een zwaar gefundeerd gedeelte van de laboratoriumvloer is opgesteld. De massa van het belastingsysteem wordt met een stootblok in beweging gebracht. Dit stootblok is aan een arm, draaiend om een vast scharnierpunt bevestigd. Het scharnier van de valhamer is van stelbouten voorzien, waarmee de as van het scharnier zodanig kan worden gesteld, dat de beide blokken elkaar bij de slag centrisch treffen. Het vrije einde van de arm van de valhamer loopt langs een gebogen tandbaan. In deze tandbaan kan op verschillende hoogtes een ophanghaak voor de valhamer worden vastgezet. Fijnregeling van de valhoek is mogelijk doordat het ophang-oog in de arm van de valhamer van stelbouten is voorzien.

In de gebogen tandbaan zijn tanden gemonteerd, waarin een pal van een opvangmechanisme voor de valhamer kan ingrijpen. Aan het begin van een proef is de valhamer aan de haak opgehangen en wordt de pal door een borg zover teruggehouden, dat tijdens de val na het losslaan van de haak de pal vrij blijft van de tanden van de tandbaan. Aan deze borg zijn stiften aangebracht, die na het botsen van de hamer op de massa van het belastingsysteem op stelpennen komen te rusten. Door het gewicht van de hamer drukken de stiften de borg uit de pal weg, waarna deze door een veer naar voren wordt getrokken. Bij het terugkeren van de massa van het belastingsysteem uit de uitgebogen stand ontstaat opnieuw een botsing tussen beide massa's, waarbij de valhamer omhoog wordt geworpen. De pal ratelt daarbij langs de tanden en grijpt in, zodra de valhamer opnieuw naar beneden begint te vallen. Met deze constructie wordt bereikt, dat de massa van het belastingsysteem slechts eenmaal in neerwaartse richting door de valhamer

wordt aangeslagen, zodat in principe op deze wijze slechts een enkele belastingspuls wordt opgewekt.

In fig. 17 (blz. A-11) zijn de essentiële onderdelen van het apparaat schematisch in de vorm van massa's en veren weergegeven. Tevens is schematisch aangegeven op welke wijze de onderdelen bewegen na het loslaten van de valhamer. Tijdens de duur van de belastingspuls beweegt de massa van het belastingsysteem naar een uiterste laagste stand en keert dan weer naar zijn evenwichtsstand terug. Bij het verplaatsen van deze massa levert de dynamometer een van de oplegreacties, welke de bladveer in evenwicht houden. Deze oplegreactie is tevens de belastingspuls, die voor de snelle buigingsbelasting op de proefstaaf wordt gebruikt. Wanneer de verplaatsingen bij de proefstaaf klein blijven ten opzichte van de verplaatsingen van de massa van het belastingsysteem wordt de beweging van deze laatste slechts zeer weinig door het gedrag van de proefstaaf beïnvloed. In de volgende paragrafen zal worden vermeld op welke wijze de dimensionering van de onderdelen van het systeem is vastgesteld.

3.2 Onderzoek naar het verloop van de kromming van het midden van de proefstaaf onder de gebruikte dynamische belasting.



Het schema van de proefbalk met de belasting is in nevenstaande schets aangegeven. De volgende punten vormen de grondslag voor de berekeningen:

1. De berekeningen worden in het praktische eenheden-stelsel uitgevoerd.
2. De grondslagen van de berekeningsmethode zijn in het theorie-verslag van dit afstudeeronderzoek opgenomen en worden hier bekend verondersteld.
3. De dynamische belasting van de proefstaaf verloopt zuiver sinusvormig met de tijd. De oplooptijd van de belasting is gelijk aan de reeds eerder genoemde 10 milliseconden. Dat wil zeggen, dat de periode van het belastende massa-veersysteem is: $T = 0,04$ sec.
4. De berekeningen zijn betrokken op de staafas. De puntlasten op de bovenkant van de staaf aangebracht spreiden zich zodanig, dat op de staafas een gelijkmatige belasting ontstaat over een gebied met een lengte, welke tweemaal die van de afstand der puntlasten bedraagt ($d = 2c$).

5. De numerieke berekeningen zijn gebaseerd op de afmetingen, zoals die in de volgende paragraaf bij de dimensioneringsberekeningen voor de proefstaaf zijn bepaald.
6. Het verloop van de uitbuigingen en de krommingen wordt berekend voor het geval, dat de gehele staaf elastisch blijft.
Deze beperking is toelaatbaar, daar het gaat om het bepalen van storende invloeden van de massakrachten van de staaf zelf. Zijn deze in het elastische gebied gering, dan zijn ze ook bij verdere vervorming tot in het plastische gebied gering.

De genormeerde eigenfuncties voor vrij opgelegde prismatische staven zijn:

$$\phi_{n,x} = \sqrt{\frac{2}{\mu l}} \sin n\pi x/l \quad (3.2.a)$$

Hierin is: Massa per lengte-eenheid $\mu = \rho BH \text{ kg/m}$

Soortelijke massa van staal $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

De karakteristieke dynamische belasting is:

$$L_{n,x} = \mu \omega_n^2 \phi_{n,x} \quad (3.2.b)$$

De uitwendige belasting is:

$$p_{t,x} = p_{x,\max} \sin \Omega t \quad (3.2.c)$$

Hierin is: $p_{x,\max} = p_{t,\max}/2d$ en $\Omega = 2\pi/T$.

Het maximum van de uitwendige belasting uitgedrukt in de karakteristieke belasting is:

$$p_{x,\max} = \sum_{n=1}^{\infty} p_{n,x} = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n L_{n,x} \quad (3.2.d)$$

De factor ψ_n volgt uit:

$$\psi_n = 1/\omega_n^2 \int_0^l p_{x,\max} \phi_{n,x} dx \quad (3.2.e)$$

Hierin is: $\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{EI/\mu}$

Voor ψ_n is: $\psi_n = \frac{1}{\omega_n^2} \int_{\frac{1}{2}l-d}^{\frac{1}{2}l+d} p_{x,\max} \sqrt{2/\mu l} \sin n\pi x/l \cdot dx$

$$\psi_n = \frac{2 p_{x,\max}}{EI} \sqrt{\frac{2}{\mu l}} \frac{\mu l^5}{\pi^5} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^5} \sin n\pi d/l \quad (3.2.f)$$

Invullen van (3.2.f), (3.2.b) in (3.2.d) geeft voor n is oneven:

$$p_{n,x} = \frac{4 p_{x,\max}}{\pi} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n} \sin n\pi d/l \cdot \sin n\pi x/l \quad (3.2.g)$$

Voor de belasting geldt verder:

$$p_{t,x} = f_t \sum_{n=1}^{\infty} p_{n,x} \quad \text{met } f_t = \sin \Omega t$$

De staaf is bij het begin van het belasten in de evenwichtsstand in rust.
Er is geen vrije trilling en de uitbuigingen volgen uit:

$$ij_{t,x} = \sum_{n=1}^{\infty} D_{n,t} \psi_n \phi_{n,x} \quad (3.2.h)$$

$D_{n,t}$ volgt uit: $D_{n,t} = \omega_n \int_{t_0}^{t'} f_{t'} \sin \omega_n (t-t') dt'$, zodat is:

$$D_{n,t} = \frac{\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_n} \sin \omega_n t}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} \quad (3.2.j)$$

De formules (3.2.a), (3.2.f) en (3.2.j) invullen in (3.2.h) geeft:

$$ij_{t,x} = \frac{4 p_{x,\max} \cdot l^4}{\pi^5 \cdot EI} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^5} \frac{\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_n} \sin \omega_n t}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} \sin \frac{n\pi d}{l} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (3.2.k)$$

De kromming wordt in het midden van de staaf gemeten. Zolang de staaf elastisch blijft, bestaat er een vast verband tussen kromming en moment in een doorsnede. Het optreden van storende invloeden kan dus voor het moment worden nagegaan.

$$\text{Nu is: } M_{x,t} = -EI \frac{\partial^2 i_{x,t}}{\partial x^2}$$

Door differentiëren van (3.2.k) wordt gevonden:

$$M_{x,t} = \frac{4 p_{x,\max} l^2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3} \frac{\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_n} \sin \omega_n t}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} \sin \frac{n\pi d}{l} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (3.2.1)$$

Voor het midden van de staaf is dan:

$$i_{x/2,t} = \frac{4 p_{x,\max} l^4}{\pi^5 EI} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \sin \frac{n\pi d}{l} \frac{\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_n} \sin \omega_n t}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} \quad (3.2.m)$$

$$M_{x/2,t} = \frac{4 p_{x,\max} l^2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin \frac{n\pi d}{l} \frac{\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_n} \sin \omega_n t}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} \quad (3.2.n)$$

In het onderstaande zijn de gegevens, die de grondslag vormen voor de numerieke berekeningen van de formules (3.2.m) en (3.2.n) opgenomen.

1) De cirkelfrequentie der uitwendige belasting

$$\Omega = 2\pi/T = 2\pi/0,04 = 157 \text{ rad/sec.}$$

2) De overspanning van de proefstaaf: $l = 0,600 \text{ m}$

De staafhoogte : $H = 0,040 \text{ m}$

De belastingsspreiding : $d = 2c = 2 \times 0,025 = 0,050 \text{ mm.}$

3) De cirkelfrequenties van de staaf:

$$\omega_1 = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{EI/\mu} = \frac{\pi^2 H}{l^2} \sqrt{E/12\rho} = 14,4 \text{ H/l}^2 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_n = n^2 \omega_1$$

Uit deze waarden voor ω_n en (3.2.m) en (3.2.n) blijkt, dat de staafbreedte geen invloed heeft op de grootte van de storende massakrachten door de staaf zelf veroorzaakt. Nu is:

$$\omega_1 = 1,6 \times 10^3 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_3 = 14,4 \times 10^3 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_5 = 40,0 \times 10^3 \text{ rad/sec}$$

Voor de doorbuigingen in het midden van de proefstaaf wordt nu gevonden:

$$ij_{\frac{1}{2}l,t} = \frac{4 p_{x,max} \cdot l^4}{\pi^5 EI} \begin{bmatrix} 0,2613 \sin \Omega t - 0,0256 \sin \omega_1 t \\ 0,0029 \sin \Omega t - 0 \sin \omega_3 t \\ 0,0003 \sin \Omega t - 0 \sin \omega_5 t \end{bmatrix}$$

$$y_{\frac{1}{2}l,t} = \frac{4 p_{x,max} \cdot l^4}{\pi^5 \cdot EI} \begin{bmatrix} 0,2645 \sin \Omega t - 0,0256 \sin \omega_1 t \end{bmatrix}$$

Voor het moment in het midden van de proefstaaf geldt:

$$M_{\frac{1}{2}l,t} = \frac{4 p_{x,max} \cdot l^2}{\pi^3} \begin{bmatrix} 0,2613 \sin \Omega t - 0,0256 \sin \omega_1 t \\ 0,0262 \sin \Omega t - 0,0003 \sin \omega_3 t \\ 0,0077 \sin \Omega t - 0 \sin \omega_5 t \end{bmatrix}$$

$$M_{\frac{1}{2}l,t} = \frac{4 p_{x,max} \cdot l^2}{\pi^3} \begin{bmatrix} 0,2952 \sin \Omega t - 0,0256 \sin \omega_1 t - 0,003 \sin \omega_3 t \end{bmatrix}$$

De gevonden betrekkingen voor het verloop van de doorbuiging en van het moment tonen, dat:

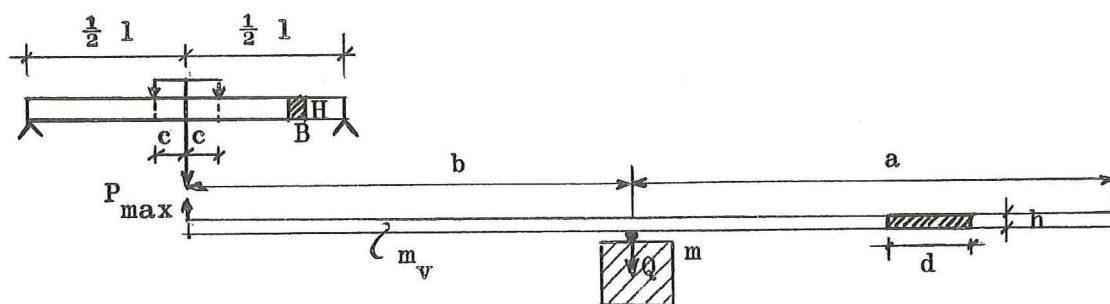
1. Geen storende invloeden van belang ten gevolge van de hogere orde-trillingen van de proefstaaf optreden.
2. De amplitude van de 1e orde-trilling van de proefstaaf ongeveer 10% van de amplitude van de gedwongen trilling bedraagt. In de gemeten diagrammen van het rekverloop in het midden van de proefstaaf is de rimpeling door de 1e orde-trilling van de staaf niet gevonden.

3.3 Dimensionering van de proefstaaf en het belastingssysteem.

Bij de dimensionering is van de volgende punten uitgegaan:

1. Op het moment, dat de topwaarde van een belastingspuls wordt bereikt, verkeert het gehele systeem in rust. Het belastingssysteem en de proefstaaf zijn dan beiden in de uiterste uitgebogen stand. Voor deze uiterste uitgebogen stand kunnen weerstanden en vervormingen "statisch" worden berekend.
 2. Het maximum van een belastingspuls moet zo groot gemaakt kunnen worden, dat in de meetdoorsnede van de proefstaaf daarmee een moment kan worden opgewekt, waarbij de spanningen in de uiterste vezels hoger zijn dan de dynamische vloeispanning van het materiaal. Voor de zekerheid is er van uitgegaan, dat de spanningen in de bladveer nergens hoger mogen worden, dan de "statische" vloeispanning van het materiaal van de bladveer.
 3. De periode van het belastingssysteem wordt door het opleggen op de verende proefstaaf niet merkbaar beïnvloed als het belastingssysteem aanzienlijk slapper is dan de proefstaaf. Dit wordt bereikt door de doorbuiging van het belastingssysteem minimaal 10 maal groter te laten zijn dan de doorbuiging van de proefstaaf.
 4. De geconcentreerde massa van het belastingssysteem kan zowel binnen als buiten de opleggingen van de bladveer worden aangebracht. De eerste oplossing blijkt gunstiger te zijn, en zal hier verder worden onderzocht.
 5. De breedte van de proefstaaf moet zo groot zijn, dat rekstrookjes van normale afmetingen op de boven- en onderzijde kunnen worden aangebracht. Tevens mag de gedrukte zone tijdens het plastisch vervormen niet zijdelings kunnen wegbuigen.
- De hoogte van de proefstaaf moet zo groot zijn, dat op één staafhelft rekstrookjes op verschillende afstanden van de staafas naast elkaar op de zijkanten van de staaf kunnen worden aangebracht.

6. De massa van de bladveer moet ten opzichte van de geconcentreerde massa van het belastingssysteem zo klein mogelijk zijn. Door het aanslaan van de geconcentreerde massa ontstaan door de massa's van de delen van de bladveer tussen de opleggingen en de geconcentreerde massa storende massakrachten, die geringer zijn naarmate de massa van de bladveer kleiner is ten opzichte van de geconcentreerde massa. Aan dit punt kan in verband met de andere eisen, die moeten worden gesteld niet goed worden voldaan. De storende massakrachten hebben tijdens de metingen dan ook moeilijkheden veroorzaakt.
7. De geconcentreerde massa van het belastingssysteem moet zo worden gekozen, dat het belastingssysteem de eerder als gewenst genoemde periode van $T = 0,04$ sec heeft.
8. De berekeningen zijn uitgevoerd in het praktische eenheden-stelsel. Alleen de afmetingen van de doorsnede van de proefstaaf en van de bladveer worden in cm aangegeven.



Het schema van het systeem is in bovenstaande schets weergegeven.

De dynamische vloeispanning voor de proefstaaf wordt aangeduid met σ_{dv} , de statische vloeispanning voor de bladveer met σ_{sb} . Ter vereenvoudiging van de formules zijn de spanningen aangegeven met dimensiloze symbolen, die het aantal 10^7 N/m^2 van de spanningen aangeven. Tussen haakjes is de overeenkomstige waarde van de spanning, uitgedrukt in de bekende waarde kgf/cm^2 aangegeven.

Nu is:

$$\sigma_{dv} = \hat{\sigma} \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \quad (\sigma_{dv} = \hat{\sigma} \cdot 10^2 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$\sigma_{sb} = \sigma^x \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \quad (\sigma_{sb} = \sigma^x \cdot 10^2 \text{ kgf/cm}^2)$$

In de uiterste uitgebogen stand is dan voor de proefstaaf:

$$M_{\max} = \frac{1}{2} P_{\max} \left(\frac{1}{2} l - c \right) = W \cdot \bar{C}_{dv}$$

$$\delta_c = \frac{W \cdot \bar{C}_{dv}}{3EI} \left(\frac{1}{2} l - c \right) \left(\frac{1}{2} l + 2c \right)$$

De afmetingen van de staaf en de waarde van E kunnen in de formules worden gebracht ($E = 20 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$). De waarde van c is niet bekend. Wordt aangehouden, dat een afstand tussen de belastingspunten van 10 cm zeker voldoende is voor het aanbrengen van rekstrookjes en dat de proefstaaf een lengte van ca. 1 m zal krijgen, dan is $c = \frac{1}{20} l$.

De formules voor de sterkte en de stijfheid van de proefstaaf zijn dan:

$$\text{Sterkte} \quad P_{\max} = \frac{200}{27} \frac{B H^2}{l} \hat{\sigma} \quad \text{N} \quad (3.3.a)$$

$$\text{stijfheid} \quad \delta_c = \frac{9}{10^4} \frac{l^2}{H} \hat{\sigma}^m \quad (3.3.b)$$

Ter plaatse van de geconcentreerde massa ondervindt de bladveer in de maximum uitgebogen stand de kracht Q, waarvoor $P_{\max}$ één van de bijbehorende oplegkrachten is.

Nu is:

$$Q = \frac{a+b}{a} \cdot P_{\max} \quad \text{N}$$

$$P_{\max} \cdot b = W \cdot \bar{C}_{sb} = \frac{5}{3} dh^2 \cdot \hat{\sigma}^x \quad \text{Nm} \quad (3.3.c)$$

$$\delta_Q = \frac{Q a^2 b^2}{3 EI \cdot (a+b)} = \frac{P_{\max} ab^2}{3 EI} = \frac{P_{\max} ab^2}{5 \cdot 10^2 \cdot dh^3} \quad \text{m} \quad (3.3.d)$$

Ten gevolge van de doorbuiging van de proefstaaf zou bij het recht blijven van de bladveer het punt Q zakken over f_{Qb} .

$$f_{Q\delta} = \frac{a}{a+b} \cdot \delta_c \text{ m}$$

De doorbuiging door Q moet nu een factor ϕ groter zijn dan de waarde voor $f_{Q\delta}$.

$$\delta_Q = \phi \cdot f_{Q\delta} = \phi \cdot \frac{a}{a+b} \cdot \delta_c \text{ m} \quad (3.3.e)$$

De combinatie van (3.3.a) en (3.3.c) geeft:

$$dh^2 = \frac{40}{9} \frac{b}{l} \frac{\hat{\sigma}}{\sigma^x} BH^2 \text{ cm}^3 \quad (3.3.f)$$

De combinatie (3.3.a), (3.3.b), (3.3.d) en (3.3.e) geeft:

$$dh^3 = \frac{4000}{243} \frac{a+b}{\phi} \frac{b^2}{l^3} BH^3 \text{ cm}^4 \quad (3.3.g)$$

Uit (3.3.f) en (3.3.g) volgt:

$$d = \frac{324}{10^3} \frac{\phi^2 l^3}{(a+b)^2 b} \left(\frac{\hat{\sigma}}{\sigma^x} \right)^3 \cdot B \text{ cm} \quad (3.3.h)$$

$$h = \frac{100}{27} \frac{(a+b) b}{\phi l^2} \frac{\sigma^x}{\hat{\sigma}} H \text{ cm} \quad (3.3.j)$$

De massa van de bladveer volgt uit:

$$m_v = 7,85 \times 10^3 \times d \times 10^{-2} \times h \times 10^{-2} \times (a+b) \text{ kg}$$

Hieruit volgt na substitutie van (3.3.h) en (3.3.j)

$$m_v = 0,942 \times \phi \times l \times \left(\frac{\hat{\sigma}}{\sigma^x} \right)^2 \times BH \text{ kg} \quad (3.3.k)$$

De kleinste massa van de bladveer wordt verkregen door:

1. Voor ϕ de kleinst mogelijke waarde te kiezen, $\phi = 10$.
2. De doorsnede van de proefstaaf zo klein mogelijk te houden. Om aan de eerder genoemde eisen te kunnen voldoen is bij deze dimensioneringsberekeningen uitgegaan van de afmetingen:

$B_1 = 1,5$ cm en $H_1 = 4,0$ cm.

Bij de eerste proeven werden staven met een breedte $B = 2,0$ cm gebruikt. Toen bleek, dat de gewenste spanning in de proefstaaf niet kon worden bereikt. Uiteindelijk is de breedte van de staaf zonder dat dit moeilijkheden opleverde verminderd tot $B = 1,2$ cm.

3. Bij de dimensionering is aangenomen, dat de dynamische vloeispanning voor Fe.37 $\pm 50\%$ groter zou zijn dan de statische vloeispanning en een waarde zou hebben van 4000 kgf/cm^2 . Voor het spanningssymbool $\hat{\sigma}$ komt dit overeen met de waarde $\hat{\sigma} = 40$.
4. Voor de bladveer is aangenomen, dat een materiaal met een elasticiteitsgrens van 3600 kg/cm^2 gevonden zou kunnen worden, overeenkomend met een waarde voor het spanningssymbool $\hat{\sigma}^x = 36$.
5. De lengte van de proefstaven dient eveneens zo klein mogelijk te zijn. Om de invloed van de dwarskrachten gering te houden moet ongeveer $l = 10xH$ genomen worden. De lengte van l is vastgesteld op $l = 0,60$ m.

De massa van de bladveer volgt met deze waarden uit (3.3.k) als:

$$m_v = 0,942 \times 10 \times 0,60 \times \left(\frac{40}{36}\right)^2 \times 1,5 \times 4,0 = 41,9 \text{ kg}$$

De geconcentreerde massa van het belastingssysteem bepaalt de periode van dit systeem en dus de oplooptijd van de belasting.

De veerstijfheid van het tot aequivalent massaveersysteem vereenvoudigde belastingssysteem volgt uit (3.3.d) en $Q = \frac{a+b}{a} P_{\max}$ als:

$$k = \frac{Q}{\delta_Q} = \frac{3 EI (a+b)}{a^2 b^2} = 500 dh^3 \frac{1}{(a+b)^3} \frac{(a+b)^4}{a^2 b^2} \text{ N/m} \quad (3.3.1)$$

De massa van het aequivalente systeem bestaat uit de geconcentreerde massa plus de halve bladveer-massa. Dus is:

$$\text{Oplooptijd} = \frac{1}{4} T = \frac{\pi}{2} \sqrt{m + \frac{1}{2} m_v / k} \quad (3.3.m)$$

Uit (3.3.m) blijkt, dat bij een bepaalde waarde voor de oplooptijd T voor m een zo hoog mogelijke waarde wordt verkregen als k zo groot mogelijk is. Door m groot te maken ten opzichte van m_v wordt de invloed van storende massakrachten verminderd. De waarde voor k is voor een bepaalde bladveerlengte minimaal als $a = b$. Voor het geval $a \neq b$ zijn de storende

massakrachten asymmetrisch. De hinder, die daarvan moet worden verwacht, is groter dan de geringe invloed, die het symmetrisch plaatsen van de geconcentreerde massa op de veerstijfheid K en daardoor op de grootte van de benodigde geconcentreerde massa heeft. Verder zal dus met $a = b$ worden gerekend. De formules (3.3.h) en (3.3.j) worden met de in het voorgaande vermelde waarden herleid tot:

$$d = \frac{3,6}{a} \text{ cm en } h = \frac{200}{27} a^2 \text{ cm} \quad (3.3.n)$$

Door enige malen proberen zijn geschikte maten voor de doorsnede van de bladveer te vinden. Uiteindelijk werd:

$$\text{Berekend: } d = 14 \text{ cm} \quad h = 3 \text{ cm} \quad a = b = 0,65 \text{ m}$$

$$\text{toegepast: } d = 15 \text{ cm} \quad h = 3 \text{ cm} \quad a = b = 0,75 \text{ m}$$

De waarde voor k volgens formule (3.3.1) is dus:

$$k = 500.15.3^3 \frac{1}{(2.0,75)^3} \cdot 16 = 96.10^4 \text{ N/m} \quad (3.3.o)$$

De geconcentreerde massa m is zo groot gekozen als met het oog op de gewenste oplooptijd mogelijk is. De massa werd uiteindelijk bepaald op 75 kg. Voor de oplooptijd volgt nu met (3.3.m):

$$\text{Oplooptijd} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{75 + 49,1/2}{96.10^4}} = 0,016 \text{ sec.} \quad (3.3.p)$$

3.4 Constructie en benodigde slaghoek voor de valhamer.

De keuze van de massa van de valhamer is bepaald op de volgende wijze. Het centriscche treffen van beide botsende massa's moet door een geleiding van het valblok worden verzekerd. Daarvoor is het valblok met een arm scharnierend om een vaste as aangebracht. Door het horizontale opstellen is de slaghoek van de hamer beperkt tot 90° . De beperkte slaghoek beperkt de snelheid, waarmee de valhamer de geconcentreerde massa van het belastingssysteem kan treffen. Een zo goed mogelijke energie-overdracht is daarom noodzakelijk.

De beste energie-overdracht tijdens de stoot vindt plaats bij blokken van gelijke massa en vorm. In alle andere gevallen komt slechts een gedeelte van de energie-overdracht op het stilstaande blok tot uitdrukking in de vorm van kinetische energie van het gehele blok, terwijl een ander gedeelte in door het blok heen en weer gaande spanningsgolven verloren gaat. Om deze reden is de massa van de valhamer gelijk gekozen aan de geconcentreerde massa van het belastingssysteem. De tijd, waarin in dit geval de energie-overdracht plaats heeft, is die, welke nodig is om de bij de stoot opgewekte spanningsgolven door de blokken heen en weer te laten lopen. De af te leggen weg is daarbij tweemaal de blokhoogte, of wel circa 0,50 m. De golven in de blokken blijven elastisch en planten zich als zodanig in staal voort met een snelheid van 5000 m/sec. De tijdsduur van de stoot is dus circa 10^{-4} sec, dat is 1% van de oplooptijd. De tijdsduur van de stoot is dus ten opzichte van de overige verschijnselen zeer kort. De vorm, welke aan de op elkaar stotende oppervlakken moest worden gegeven, moest proberender wijs worden gevonden. Uiteindelijk is als de beste oplossing gevonden het afronden van beide oppervlakken en het aanbrengen van een zekere harding in de oppervlakken. Met deze maatregelen mag worden aangenomen, dat de kinetische energie van de valhamer practisch geheel op de geconcentreerde massa wordt overgedragen, zodat, daar beide massa's gelijk zijn, de valsnelheid van de hamer op het moment van botsen wordt overgedragen op de geconcentreerde massa.

De arm van de valhamer is gemaakt van een profiel L-12, waarin de hamer met bouten is opgehangen. Voor de arm moest een zodanig slap profiel worden gekozen, dat het afremmen van de hamermassa bij het ingrijpen van de pal in de tandbaan door de vering van de arm zo geleidelijk plaats zou vinden, dat een eenvoudige bevestiging van de hamer aan de arm niet overbelast zou worden. Het toegepaste profiel L-12 voldeed in de slappe richting aan deze eis.

Het botsen van de blokken vindt plaats op het moment, dat de arm van de valhamer in de horizontale stand is gekomen. De slaghoek van de hamer wordt ten opzichte van de horizontale stand van de arm aangegeven. Deze stand zelf wordt aangeduid met φ_e , welke dus gelijk nul is. De hoek van waaruit de hamer begint te vallen wordt aangeduid met φ_0 .

Het massa-traagheidsmoment van de gehele valhamer om de as werd berekend op $J = 147 \text{ kg m}^2$.

Het moment van de gehele valhamer om de as is in de stand φ berekend op:
 $M = 1124 \cos \varphi \text{ Nm}$.

De bewegingsvergelijking voor de hamer luidt dan:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -8 \cos \varphi$$

Deze vergelijking oplossen naar $\frac{d\varphi}{dt}$ en het invullen van de bekende begin- en eindvoorwaarden geeft:

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{\varphi = \varphi_0} = 4 \sqrt{\sin \varphi_0} \text{ rad/sec.}$$

De afstand van het zwaartepunt van de hamer tot de as is 1,30 m, zodat de snelheid van de hamer op het moment van het stoten is:

$$v_0 = 1,30 \cdot 4 \cdot \sqrt{\sin \varphi_0} = 5,2 \sqrt{\sin \varphi_0} \text{ m/sec} \quad (3.4.a)$$

Deze snelheid wordt op de massa van het belastingssysteem overgedragen. Een massaveersysteem met de beginsnelheid v_0 bereikt een uiterste uitgebogen stand $\delta_Q = v_0 / \Omega$. Hierin is Ω volgens (3.3.p): $\Omega = 2\pi / 4 \times 0,016 = 98,1 \text{ rad/sec}$, zodat

$$\delta_Q = v_0 / 98,1 \text{ m} \quad (3.3.b)$$

Met behulp van (3.3.d) en de vastgestelde afmetingen van de onderdelen is voor $P_{\max}$ op de proefstaaf te berekenen:

$$P_{\max} = \frac{5 \times 10^2 \times 15 \times 3^3}{(0,75)^3} \delta_Q = 4,8 \times 10^5 \cdot \delta_Q \quad (3.4.c)$$

Met (3.4.a), (3.4.b) en (3.4.c) volgt dan voor $P_{\max}$:

$$P_{\max} = \frac{4,8 \times 10^5 \times 5,2}{98,1} \sqrt{\sin \varphi_0} = 2,55 \times 10^4 \sqrt{\sin \varphi_0} \quad (3.4.d)$$

Met (3.3.a) kan uit $P_{\max}$ de waarde voor $\hat{G}$ worden berekend.

$$\hat{G} = \frac{27}{200} \frac{1}{BH^2} P_{\max} = \frac{2,7}{800} P_{\max} \quad (3.4.e)$$

Voor de dynamische spanning, die wordt bereikt volgt uit (3.4.e)

$$\sigma_{dv} = 2.10^7 = \frac{2.7 \times 10^5}{8} P_{\max} \text{ N/m}^2 \quad (\hat{=} \frac{2.7}{8} P_{\max} \text{ kgf/cm}^2) \quad (3.4.f)$$

Het verband tussen de slaghoek φ_0 en het maximum van de belastingspuls ($P_{\max}$) op de proefstaaf volgens (3.4.d) is in fig. 18 (blz.A-12) uitgezet. Voor de berekende punten is de bij $P_{\max}$ behorende waarde van de σ_{dyn} vermeld, berekend volgens (3.4.f).

De gehele berekening geldt zolang de proefstaaf elastisch blijft. $P_{\max}$ is namelijk afhankelijk van de weerstand van de proefstaaf. Neemt de weerstand van de proefstaaf door plastisch vervormen niet meer toe, dan zal ook $P_{\max}$ niet meer kunnen toenemen, daar deze wordt bepaald voor de dynamometer bevestigd aan de proefstaaf. Dit betekent, dat boven een zekere slaghoek een deel van de kinetische energie van de hamer wordt verbruikt in de vorm van plastische vormveranderingsarbeid van de proefstaaf.

3.5 Bijzondere punten.

a) Instelbaarheid lengte veerstrip, mogelijke variatie in de oplooptijden.

Bij het ontwerp van het frame werd er rekening mee gehouden, dat het mogelijk zou moeten zijn de lengte van de bladveer te wijzigen. Door verandering van de lengte van de bladveer is bij dezelfde grootte van de geconcentreerde massa een verandering in de oplooptijd van de belasting mogelijk. De afstand van de oplegpunten beweegt zich tussen $L_{\min} = 1,10 \text{ m}$ en $L_{\max} = 1,60 \text{ m}$. Bij de eerste proeven was de lengte van de veer gelijk aan $L_{\max}$. Naderhand is deze verminderd tot $L = 1,50 \text{ m}$ om de storende massakrachten iets te verminderen. Het effect bleek echter gering.

Bij de bepaling van de mogelijke variatie in de oplooptijden moet nog worden gesteld, dat de geconcentreerde massa in verband met de storende massakrachten zeker niet minder mag zijn dan de toegepaste massa. In de gegeven opstelling wordt het mogelijk geacht de geconcentreerde massa te verdubbelen. Het gebied van de oplooptijden kan dan variëren binnen de volgende grenzen:

$$1) \quad L_{\min} = 1,10 \text{ m} \quad m_{\min} = 75 \text{ kg}$$

$$(3.3.1) \text{ geeft nu: } k = 500.15.3^3 \cdot \frac{1}{(1,1)^3} 16 = 243,4 \cdot 10^4 \text{ N/m}$$

$$\text{Min. oplooptijd} = \frac{1}{4} T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{75 + \frac{1,1}{1,5} \times \frac{49,1}{2}}{243,4 \times 10^4}} = 0,0097 \text{ sec}$$

$$2) \quad L_{\max} = 1,60 \text{ m} \quad m_{\max} = 150 \text{ kg}$$

$$(3.3.1) \text{ geeft nu: } k = 500.15.3^3 \cdot \frac{1}{(1,6)^3} 16 = 78,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}$$

$$\text{Max oplooptijd} = \frac{1}{4} T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{150 + \frac{1,6}{1,5} \times \frac{49,1}{2}}{78,5 \times 10^4}} = 0,027 \text{ sec}$$

Het blijkt dus, dat een geringe variatie in de oplooptijden mogelijk is. Vooral de lagere oplooptijden zijn technisch van belang. Deze kunnen alleen worden bereikt door een geringere hoogte van de proefstaaf te kiezen. Aangezien dit tot een volledige nieuwe dimensionering leidt is deze mogelijkheid hier niet verder onderzocht.

b) Bediening en tijdelijke voorzieningen.

De bediening van de opstelling bestaande uit het instellen van de juiste slaghoek en het optillen van de valhamer gebeurde met de hand. Ook het losslaan van de ophanghaak van de valhamer gebeurde met de hand. Het aanbrengen van extra voorzieningen werd met het oog op het experimentele karakter van de gehele beproeving voorlopig als niet noodzakelijke luxe beschouwd.

Tijdens het vervangen van proefstaven werd de bladveer ter plaatse van de dynamometer onderstopt. Het verwijderen en aanbrengen van het belastingsverdeelblok op de proefstaven is door de constructie ervan zeer eenvoudig.

Als tijdelijke voorzieningen werden op sommige plaatsen boven de bladveer houten stoppen aangebracht. Het bleek namelijk, dat het belastingssysteem na het opwerpen van de valhamer zijn naar boven gerichte snelheid niet volledig had afgestaan. Door het boven de evenwichtsstand uitkomen van het belastingssysteem wordt een puls in de richting tegengesteld aan de richting van de gewenste belasting op de proefstaaf uitgeoefend. Dit doorslaan door de evenwichtsstand kan invloed hebben op de waarde van de restrek, welke na het geheel tot rust komen wordt gemeten. Daar de restrek na een puls een essentieel gegeven bij de berekening van de dynamische vloeispanningen is, is het doorslaan door houten stoppen, tussen de bovenkant van de bladveer en de langsbalken van het frame aangebracht, zoveel mogelijk verhinderd.

Ook bleek tijdens de proeven, dat geheel aan het begin van de belastingspuls de neiging tot opwerpen van de proefstaaf bestond. Om dit tegen te gaan zijn bij de latere proeven de proefstaven met boutjes op de assen van de opleggingen geklemd, terwijl boven de roloplegging een stalen plaat werd aangebracht, die met klossen tot vlak boven de loopvlakken van de rolschijven werd afgesteld.

4. Meetinstrumenten, ijkingen, gebruikte materialen en vervaardiging proefstukken, resultaten statische materiaalproeven.

4.1 Meetinstrumenten.

Alle statische proeven werden verricht met standaard hydraulische trekbanken, waarbij de belasting in de tijd van minimaal 1 minuut van nul tot de vloeigrens werd opgevoerd.

De verrichte statische proeven zijn:

- a₁) Zuivere trekproef op een ronde proefstaaf (dp5) van het materiaal, waarvan de dynamische materiaaleigenschappen zullen worden bepaald. De proefstaaf is willekeurig uit de beschikbare partij van het ruwe staafmateriaal gehaald en geeft de eigenschappen van het materiaal in het hart van de staven aan. Bij deze trekproef werden de vloeigrenzen, de maximum spanning en de breukrek bepaald.
- a₂) Na afloop van de dynamische proeven werden uit de boven- en onderkant van de staafkoppen van de proefstaven rechthoekige trekproefstukken dp5 genomen. Hieraan werden dezelfde metingen verricht als bij a₁. Tot deze proeven werd overgegaan, omdat uit de berekende dynamische vloeispanningen voor de uiterste vezels de indruk was verkregen, dat de resultaten van a₁ voor de uiterste vezels niet bruikbaar waren.
- b) Op het materiaal van de bladveer is een 3 punts buigproef uitgevoerd, waarbij in drie punten met meetklokjes doorbuigingen werden gemeten. Uit deze proef werd de statische vloeigrens van het materiaal van de bladveer bepaald, terwijl tevens een controle werd verkregen op de berekende stijfheid van de bladveer.
- c) Alle dynamische buigproefstaven zijn in een statische proefbank op hun buigstijfheid gecontroleerd. De staven hadden tijdens deze proeven een breedte van $B=2,0$ cm, terwijl deze breedte later voor de dynamische proeven tot $B=1,2$ cm is verminderd. [Zie (3.3)]. Door het overbrengen van de opleggingen en het belastingsverdeelblok van het dynamische beproevingsapparaat op de statische proefbank is ervoor gezorgd, dat de statische buigproeven onder dezelfde geometrische condities worden uitgevoerd als de dynamische buigproeven. De verplaatsingen werden bij de statische buigproeven in het midden en op

twee punten op gelijke afstanden ter weerszijden van het midden gemeten met meetklokjes. Twee proefstaven zijn statisch zover belast, dat grote plastische vervorming optrad. Alle overige staven zijn alleen elastisch vervormd.

De gebruikte dynamische meetapparatuur is in fig. 19 (blz. A-12) in de vorm van een blokschema aangegeven. Een gedeelte van de meetapparatuur is zichtbaar op fig. 14 (blz. A-10). De registratie van de beelden van het oscilloscoopscherm is vrijwel uitsluitend gebeurd met een met de hand bediende op de oscilloscoop gemonteerde kleinbeeld-camera. Deze camera voldeed over het algemeen goed, maar had als bezwaar, dat enige bolvormige vertekening optrad (zie fig. 29 en fig. 30 blz. A-19).

Het is mogelijk de oscilloscoop te laten starten bij een bepaalde intensiteit van een van de twee signalen. Wordt de startintensiteit zo hoog gekozen, dat de beide bundels slechts eenmaal over het scherm lopen, dan gaat een belangrijk deel van de registratie verloren, namelijk dat deel, dat het gedrag vanaf de onbelaste toestand tot het bereiken van de vereiste intensiteit omvat. Daar ook deze gegevens van belang zijn is behalve bij enige proeven in het begin de oscilloscoop steeds extern met een daarvoor ontworpen tuimelend kwikschakelaartje gestart. Deze schakelaar is op fig. 14 (blz. A-10) zichtbaar, staande op een achter de proefstaaf liggende balk. Het schakelaartje wordt door een pen aan de arm van de valhamer omgeslagen. De pen wordt zo afgesteld, dat een voldoend lange registratie van de ruststand voorafgaande aan de belastingspuls wordt verkregen.

De restrekken werden bij de dynamische proeven na iedere belastingspuls op een normale statische rekmeetkast gemeten, nadat de belastingsapparatuur tot rust was gekomen.

4.2 IJkingen.

De dynamometer is in een hydraulische trekbank geijkt. De rekken van de meetlengte bij verschillende belastingen werden daarbij op een statische rekmeetkast gemeten. Fig. 20 (blz. A-13) geeft het statische ijkdiagram voor de dynamometer. Het diagram blijkt niet geheel rechtlijnig te zijn. De afwijkingen van de gemiddelde ijklijn, die in de figuur is ingetekend, zijn gering. Het is bekend, dat in het elastische gebied de materiaal-

eigenschappen niet door de reksnelheid worden beïnvloed. Om die reden is de statische gemiddelde ijklijn tevens als ijklijn voor de dynamische metingen genomen. De dynamometerrekken, die op de foto's zijn geregistreerd, zijn in krachten omgerekend met de ijkwaarde $1000 \mu\text{-rek} \cong 1400 \text{ kg}$. De dynamometer is alleen vóór de snelle proeven statisch geijkt.

Op de foto's, die de gemeten verschijnselen tijdens de belastingspuls weergeven, zijn, voorafgaande aan een belasting, nullijnen en ijklijnen opgetekend. Hierbij werd van de externe starter gebruik gemaakt, die werd omgeslagen op een teken, dat de sluiters van de camera open stond. Tijdens het optekenen van nul- en ijklijnen was het dynamische beproevingsapparaat geheel in rust. Nullijnen en ijklijnen werden na elkaar geregistreerd. De ijklijn van de dynamometer is met de ijkknop van de Peekel 540 DNH aangebracht. De waarde van deze ijklijn komt steeds overeen met $1000 \mu\text{-rek}$ in de dynamometer.

De ijklijnen voor de op de uiterste vezels van de proefstaaf geplakte strookjes zijn vóór de metingen, waarbij het verloop van de som van de rekken van de boven- en onderkant werd gemeten, aangebracht voor een rek van 5000μ en voor de metingen, waarbij alleen het rekverloop van de onderkant van de proefstaaf werd gemeten, voor een rek van 2500μ . Deze ijkwaarden werden verkregen door in serie met het strookje een weerstandsbank op te nemen, waarmee de weerstand van het strookje met een met de ijkwaarde overeenkomende extra weerstand kan worden verhoogd. De benodigde ijkweerstand werd berekend en bij controle op een statische rekmeetkast bleek, dat de berekende ijkweerstand juist waren. Met behulp van een serie ijkweerstand van verschillende grootte is vastgesteld, dat de registratie van de rek op de oscilloscoop lineair is. De ijklijnen van de dynamometer en van de rekstrookjes op de proefstaaf werden gelijktijdig gefotografeerd. Het voordeel van de gebruikte methode van ijken is, dat door de gehele elektrische meetapparatuur heen wordt geijkt, zodat het insluipen van fouten door niet meegeijkte elektrische meetinstrumenten uitgesloten is.

4.3 Materialen, vervaardiging proefstukken.

1) Materiaal stootblokken.

Om energieverliezen te voorkomen moeten de stootblokken bij voorkeur uit één stuk bestaan. Voor de stootblokken bleek rondstaal van St. 72 met

een geschikte diameter beschikbaar te zijn. Van de mogelijkheid dit staal enigszins te harden is bij het bewerken van de stootkoppen gebruik gemaakt.

2) Materiaal bladveer.

Hiervoor bleek een gewalste plaat St.60 met afmetingen overeenkomend met de berekende benodigde breedte en hoogte van de doorsnede beschikbaar te zijn.

3) Materiaal en vervaardiging buigproefstaven.

De buigproefstaven zijn vervaardigd uit gewalste staven met een recht-hoekige doorsnede 1" x 2", Fe. 37. De chemische samenstelling werd niet nagegaan. Voor het bepalen van de statische sterkte-eigenschappen werden de in (4.1) beschreven proeven verricht. Geen der proefstukken heeft een warmtebehandeling ondergaan, voordat tot beproeven werd overgegaan.

De buigproefstaven zijn van het ruwe staafmateriaal afgezaagd. De ge-wenste afmetingen van de doorsnede zijn door schaven in de lengterich-ting van de staven verkregen. Het oppervlak van de staven vertoonde kerven in de langsrichting met een maximale diepte van circa 0,1 mm. De inkepingen, waarin de assen van de opleggingen passen, zijn uit-gefraisd. Ook op de buigproefstaven werd geen warmtebehandeling toe-gepast. De rekstrookjes zijn met een koud uithardende lijmsort be-vestigd.

4.4 Resultaten statische materiaalproeven.

1) Buigproef bladveer.

In fig. 21 (blz. A-14) is het proefstuk uit de bladveer weergegeven tezamen met de wijze, waarop het werd belast en de punten, waarin de doorbuiging werd gemeten. De $P-\delta$ diagrammen voor de drie punten zijn uitgezet. Het proefstuk is van het materiaal van de bladveer gezaagd. Boven- en onderkant van het proefstuk zijn onbewerkt gebleven. De in fig. 21 (blz. A-14) aangegeven maten zijn nominale maten. Het materi-aal blijkt een duidelijk vloeigedrag te vertonen. Tot een belasting van 4000 kg gedraagt het materiaal zich elastisch. De "statische" vloeigrens is uit deze belasting met behulp van het nominale weer-standsmoment berekend op 5000 kg/cm^2 . De stijfheid van het proefstuk werd berekend uit de verplaatsing bij klokje 2 ten opzichte van de gemid-delde verplaatsingen bij de klokjes 1 en 3. De verplaatsingen werden bepaald voor het verschil van de zakkingen bij de belastingen 4000 kg

en 1000 kg. Voor de stijfheid van het proefstuk werd gevonden:

$$EI = 1,62 \times 10^7 \text{ kg.cm}^2.$$

Voor de gehele bladveer, welke een breedte van 15 cm heeft, wordt nu voor de buigstijfheid gevonden:

$$EI_{\text{veer}} = \frac{15}{4} 1,62 \times 10^7 = 6,08 \times 10^7 \text{ kg.cm}^2.$$

Bij de dimensionering van de bladveer was berekend dat de stijfheid zou bedragen:

$$EI_{\text{veer}} = 2,1 \times 10^6 \times \frac{1}{12} \times 15 \times 3^3 = 7,09 \times 10^7 \text{ kg cm}^2.$$

2) Statistische trekproeven op het dynamisch onderzochte materiaal.

De resultaten van de statische trekproeven zijn opgenomen in tabel 2a, blz.A-32

De reksnelheid in het elastische gebied werd bij deze proeven nooit hoger dan $5 \times 10^{-4} \%$ /sec.

3) Statistische buigproeven op de proefstaven voor de dynamische proeven.

In totaal werden 10 buigproefstaven onderzocht. De staven 1 en 2 werden statisch zover belast, dat grote plastische vervormingen optraden.

De belasting werd daarbij trapsgewijze opgevoerd, waarbij iedere verhoging van de belasting met 100 kg in circa 2 minuten tot stand kwam.

De staven hadden bij deze proeven doorsneden van 20 x 40 mm, terwijl deze nominale maten niet werden nagemeten. De staven 3 en 4 werden

voor meetexperimenten met de dynamische apparatuur gebruikt, die o.a. resulteerden in het verminderen van de staafbreedte van 20 tot 12 mm.

De vermindering van de breedte van de staven 5-10 vond plaats na de statische stijfheidsmetingen. Van deze staven is de doorsnede, voor-

dat ze dynamisch werden beproefd, nauwkeurig gemeten. In tabel 3

(blz. A-33) zijn de afmetingen van deze staven opgenomen. Voor de

statische proeven moet met de nominale afmetingen van de doorsnede worden gerekend.

In fig. 22 (blz. A-15) en fig. 23 (blz. A-16) zijn de P- δ diagrammen

voor de staven 1 en 2 weergegeven tezamen met het belastingsschema

en de aanduiding van de meetpunten voor de zakkingen. Dit

schema werd ook bij de stijfheidsmetingen van de overige staven ge-

bruikt. Het resultaat van de stijfheidsmetingen is in tabel 2 (blz.

A-31) opgenomen.

Uit het nominale traagheidsmoment is de waarde van E berekend. Opvallend is de grote spreiding in de gemeten waarden van E. De metingen van de staafhoogtes van de staven 5-10, vermeld in tabel 3, (blz. A-33), laten zien, dat deze lagen tussen $40,00-0,04$ mm en $40,00+0,08$ mm. De staafbreedte van 20 mm, waarbij de stijfheidsmetingen werden uitgevoerd, werd niet nagemeten.

Waarschijnlijk is de afwijking van de nominale breedte maat niet meer dan 0,1 mm. Voor de traagheidsmomenten volgt dus $I_{\min} = 10,56 \text{ cm}^3$ en $I_{\max} = 10,79 \text{ cm}^3$ met een mogelijke spreiding gelijk 2,2% van de laagste waarde voor I. De spreiding in de waarden van E, zoals die uit de stijfheidsmetingen volgen, bedraagt 23,6% van de laagste waarde. Deze spreiding kan niet door afwijkingen van de nominale maten van de doorsnede veroorzaakt zijn. Waarschijnlijk is de spreiding in de gemeten E-waarden veroorzaakt door het niet voldoende nauwkeurig constant houden van de nominale belastingen voor de stijfheidsmetingen. De resultaten van de stijfheidsmetingen zijn zo onbetrouwbaar, dat niet met de daaruit bepaalde waarden voor E kan worden gewerkt en besloten is de gebruikelijke waarde voor de E van staal ($E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$) aan te houden bij het berekenen van spanningen uit gemeten rekken bij de dynamische proeven.

In fig. 24^a (blz. A-17) is het gemiddelde P- δ diagram voor de staven 1 en 2 weergegeven. Voor de zakking is hier de relatieve zakking bij het middelste klokje ten opzichte van de gemiddelde zakking bij de buitenste klokjes genomen. De belastingen, die op de proefstaven met een breedte van 2 cm zijn aangebracht, zijn gereduceerd voor proefstaven met een breedte van 1,2 cm. Ter vergelijking zijn theoretische P- δ krommen opgenomen behorend bij een staafbreedte van 1,2 cm en statische vloeispanningen van 2600 kgf/cm^2 en 2800 kgf/cm^2 . In fig. 24^b (blz. A-17) zijn voor verschillende waarden van de statische vloeispanning de statische weerstands-krommingsdiagrammen weergegeven. De krommen werden theoretisch berekend. De krommingen zijn die, welke in het gebied van de zuivere buiging optreden en ze zijn aangegeven in de vorm van de som van de rekken in de onderste- en de bovenste uiterste vezel. Door deze wijze van uitzetten zijn de krommen van fig. 24^b voor statische vervormingen vergelijkbaar met de krommen, zoals die voor de dynamische vervormingen zullen worden aangegeven.

5. Resultaten van de dynamische proeven.

5.1 Metingen van de kracht in de dynamometer en van de weg van de geconcentreerde massa voor het geval, dat op de plaats van de proefstaven een zeer stijve balk is aangebracht.

De bedoeling van deze metingen was te bepalen, wat de grootste waarde van het maximum van een belastingspuls zou zijn, die zou kunnen worden opgewekt. Het meten van de afgelegde weg van de geconcentreerde massa had alleen een controle op de praktische juistheid van het theoretisch voorspelde gedrag ten doel. De foto's fig. 25 (blz. A-18) en fig. 26 (blz. A-18) geven het resultaat van twee van deze metingen weer. De lijn, die het meest vloeiend verloopt, is die voor de weg, de andere stelt de kracht in de dynamometer voor. Deze foto's behoren tot een kleine serie, die met een bij de oscilloscoop behorende camera werd gemaakt, welke geen bolvormige vertekening vertoonde. Bovendien behoren deze opnames nog tot de experimenten, waarbij de registratie gestart werd op de intensiteit van een van de twee signalen, zodat het gedrag bij het begin van de belastingspuls niet op de foto's voorkomt. Bij beide foto's valt het op, dat de belastingspuls verre van het geïdealiseerde sinusvormige verloop heeft, terwijl dit voor de weg van de geconcentreerde massa wel met goede benadering geldt. De storende massakrachten zijn hier zodanig groot, dat meerdere pulsen van vrijwel gelijke intensiteit in veel kortere tijd worden opgewekt, dan de ene geïdealiseerde puls, die had moeten ontstaan. Verder valt het op, dat de geconcentreerde massa na het terugkeren uit de gewenste uitgebogen stand door de evenwichtstand heen gaat en over circa de halve amplitude van de uitslag in de bedoelde richting in de tegengestelde richting doorslaat, fig. 25 (blz. A-18). Fig. 26 (blz. A-18) werd opgenomen, nadat naast de geconcentreerde massa een houten stop boven de bladveer was aangebracht om het doorslaan in de verkeerde richting te verhinderen. Het effect van deze maatregel is duidelijk waarneembaar. Tijdens de eerste uitslag van de massa in de gewenste richting blijken de diagrammen voor de kracht en de weg onder gelijke condities praktisch identiek te zijn. Ook bij alle andere metingen bleek dit het geval te zijn. Uit het gemeten krachtverloop voor dit geval blijkt, dat het beproevingsapparaat niet geschikt is voor het uitvoeren van dynamische zuivere trekproeven.

Het monteren van trekproefstukken in een stijve bevestiging aan het frame zou tot identieke belastingen leiden als die van de fig. 25 en 26. Zoals uit het vervolg zal blijken, wordt de situatie gunstiger als de dynamometer aan een slapper systeem wordt bevestigd. Ook dan blijkt het effect van de storende massakrachten echter nog duidelijk aanwezig. Het vasthouden van de geconcentreerde massa in de eerste uiterste uitgebogen stand leidt in het gegeven geval zeker niet tot een snel naar een constante waarde oplopende belasting.

De slaghoek bij deze proeven was $\varphi_0 = 10^\circ$. Bij deze hoek is volgens fig. 18 (blz. A-12) $P_{\max} = 11000$ N. Met formule (3.4.c) wordt daarbij voor δ_Q berekend: $\delta_Q = 2,29 \times 10^{-2}$ m volgens de fig. 25 (blz. A-18) en 26 (blz. A-18) werd voor δ_Q gemeten $2,3 \times 10^{-2}$ m. Deze waarde is dus zeer goed in overeenstemming met de theoretisch berekende waarde.

5.2 Metingen van de eigenfrequenties van de proefstaaf alleen en van de proefstaaf samen met het belastingsverdeelblok.

Voor een proefstaaf N^o 6 werden eigenfrequenties gemeten. Hiertoe werd de staaf vrij op de opleggingen van het dynamische beproevingsapparaat gelegd, resp. werd de staaf met het blok samen vrij op de opleggingen gelegd. Met een hamer werd vervolgens de staaf nabij het midden aangeslagen. De opgewekte trilling werd met de strookjes die op de uiterste vezels van de meetdoorsnede van de staaf aangebracht waren, gemeten. Het resultaat van deze metingen wordt weergegeven door de fig. 27 (blz. A-19) en 28 (blz. A-19). In beide gevallen blijkt een aanzienlijke demping aanwezig te zijn. Het mechanisme van deze dempingen is niet bekend. Vermoedelijk is het niet geheel vastliggen van de proefstaaf op de opleggingen, waardoor opspringen van de oplegging mogelijk is één van de oorzaken. Ook Coulomb- en viskeuze dempingen in de materialen zullen vermoedelijk een rol spelen. Bij de berekening van het resonantie-diagram voor de staaf samen met het blok zal worden aangenomen, dat de gehele demping als viskeuze demping in het tot aequivalent systeem te schematiseren tot uitdrukking kan worden gebracht. Voor de proefstaaf zelf werd op deze wijze voor de periode van de 1^e orde 4,5 millisec gemeten, overeenkomend met $\omega_1 = 1,4 \times 10^3$ rad/sec. In (3.2) werd voor ω_1 berekend: $\omega_1 = 1,6 \times 10^3$ rad/sec. Voor de periode van de staaf met het blok samen werd gemeten $T = 10,4$ millisec.

In het volgende zal deze periode door berekening worden bepaald. Daarvoor is voor het stelsel van de proefstaaf met het blok het aequivalente systeem bepaald. De stijfheid van de veer van dit systeem is met (3.3.a) en (3.3.b) te berekenen als:

$$k = \frac{P_{\max}}{\delta_c} = \frac{6 EI}{(\frac{1}{2}l-c)^2(\frac{1}{2}l+2c)} = 2,90 \times 10^6 \text{ N/m}$$

De massa van het blok is berekend. Daar de constructie uit vrij veel onderdelen met moeilijk te berekenen massa's bestaat, is de berekening van de massa van het blok niet erg nauwkeurig. Voor de massa van het aequivalente systeem werd berekend:

$$m_e = m_{\text{blok}} + m_{\text{staaf}} = 6,1 + 1,1 = 7,2 \text{ kg.}$$

$$\text{Nu wordt: } T = 2\pi \sqrt{7,2 / 2,90 \times 10^6} = 9,9 \times 10^{-3} \text{ sec.}$$

Het blijkt, dat de gemeten waarden in beide gevallen goed met de berekende waarden overeenkomen.

Op te merken valt nog, dat de periode van de hoofdbelastingspuls $T = 64 \times 10^{-3} \text{ sec.}$ groter is dan de resonantieperiode van het systeem, dat erdoor wordt belast (staaf met blok). Voor de periode van de storende pulsen, waarvoor $T_{\text{storend}} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ sec.}$ (zie fig. 25 en 26), geldt, dat deze lager zijn dan de resonantieperiode. Op het effect hiervan zal in hoofdstuk 6 nader worden ingegaan.

5.3 Metingen en meetresultaten voor de dynamisch belaste staven.

Op de staven N^0_5 tot en met N^0_{10} werden de dynamische proeven verricht, waaruit de vloeipuntsverhoging en de dynamische weerstand bij grote plastische vervorming werden bepaald. Iedere staaf werd met een serie belastingspulsen belast, waarvan het maximum tot op het moment, dat een belangrijke restrek werd geconstateerd, steeds een hogere waarde werd gegeven door het instellen van een grotere slaghoek van de valhamer. Tijdens iedere puls werden het krachtverloop in de dynamometer en het rekverloop in de uiterste vezels van de zuiver gebogen zone van de proefstaaf geregistreerd. De foto fig. 29 (blz. A-19) geeft een beeld van zo'n meting, waarbij geen plastische vervorming optrad. De foto fig. 30 (blz. A-19) geeft een meting weer, waarbij grote plastische vervorming in de proefstaaf werd opgewekt. Op het oppervlak van de zijkanten van de staven werd na het ontstaan van een grote

plastische vervorming steeds een regelmatig patroon van vloeilijnen geconstateerd. Na iedere belastingspuls werden de restrekken gemeten. Op iedere staaf werd, nadat een aanzienlijke restrek was geconstateerd, een aantal gelijke belastingspulsen aangebracht. Alleen voor staaf 10 werden restrekken op verschillende afstanden van de staafas gemeten. Van de foto's werden het maximum van de rek in de dynamometer (het hoogste punt, dat in de kracht-registratie voorkomt) en het maximum van de rek in de proefstaaf afgelezen.

In de tabellen 4-9 (blz. A-34- blz. A-39) zijn deze waarnemingen voor ieder van de staven apart opgenomen. Achtereenvolgens is opgegeven: het nummer van de puls, de slaghoek φ_0 van de valhamer, het maximum van de kracht in de dynamometer P_{dm} (uit de afgelezen maximum rek in de dynamometer afgeleid met behulp van de gemiddelde ijkwaarde van de dynamometer), het maximum van het gemeten rekverloop en de toename van de restrek tengevolge van de belastingspuls. De volgende kolommen van deze tabellen zijn voor het verwerken van de waarnemingen benut, hetgeen in hoofdstuk 6 nader zal worden besproken.

In de fig. 31^{a,b,c} 36^{a,b,c} en fig. 36^d (blz. A-20-blz. A-28) zijn de meetresultaten grafisch weergegeven. De fig. 31^c 36^c worden in hoofdstuk 6 nader besproken.

In de fig. 31^a ... 36^a is het verband tussen de slaghoek φ_0 en het maximum van de belastingspuls (P_{dm}) uitgezet. Door de meetpunten zijn de gemiddelde krommen getrokken, welke vergeleken zijn met de theoretisch bepaalde kromme volgens fig. 18 (blz. A-12), waarvan nog eens wordt opgemerkt, dat deze slechts geldt zolang de vervorming van de proefstaaf elastisch blijft. De gemeten waarden blijken hoger te zijn dan de theoretische waarden. Dit komt doordat de gemeten P_{dm} de som is van de eigenlijke belasting en van de belasting door storende massakrachten, waardoor een rimpel in het krachtverloop wordt veroorzaakt. Voor zover uit de registraties van het krachtverloop kan worden nagegaan, komen er alleen storende massakrachten van een bepaalde frequentie voor. De amplitude van de storing verschilt bij het begin van het belasten en bij het maximum van de belasting, hetgeen waarschijnlijk door spelingen wordt veroorzaakt. De amplitude bij het maximum van de belasting is hier van belang. Daar is deze amplitude voor zover uit de registraties is af te lezen een tiende van de amplitude van de eigenlijke belastingspuls.

De gemeten waarden van P_{dm} zijn gereduceerd tot het maximum van de eigenlijke belastingspuls door P_{dm} te delen door de factor 1,1. Ook deze gereduceerde P_{dm} is in de fig. 31^a ... 36^a opgenomen.

In de fig. 31^b ... 36^b is de totale restrek aan de boven- en onderzijde na een puls tegen de som van de grootste rekken in de uiterste vezels tijdens een puls uitgezet. De waarden van deze grafieken zijn bepaald ten opzichte van de onbelaste toestand volgens de formules (6.1.a) en (6.1.b) (blz. 50).

Met deze grafieken kan het regelmatigte verloop van de waarnemingen van de maximum-rekken en de bijbehorende restrekken worden gecontroleerd. Tevens kan worden vastgesteld, wanneer een belangrijke blijvende vervorming gaat optreden. Deze krommen zijn voor de gemeten rekken van de staven met uitzondering van staaf 10 de enige controle op de juistheid van de waarnemingen. Voor staaf 10 zijn de restrekdiagrammen ten opzichte van de onbelaste toestand voor alle pulsen in fig. 36^d (blz. A-28) weergegeven. Uit deze figuur blijkt, dat het restrekverloop over de hoogte lineair is, maar dat de restrek in de onderste vezel van het lineaire verloop afwijkt. Deze afwijking is waarschijnlijk door een fout in de metingen veroorzaakt. Voor de onderste vezel is daarom de restrek bepaald uit de restrek boven en de restrek het dichtst bij de onderkant van de staaf. Die waarde is in de figuren met een driehoekje aangegeven en is verder voor de berekening van de vloeispanningen voor staaf 10 gebruikt. Zoals reeds werd opgemerkt is alleen voor staaf 10 een dergelijke controle op de gemeten restrekken mogelijk.

6. Interpretatie meetresultaten.

6.1 Bepaling van de vloeipuntsverhoging ten gevolge van het snel belasten.

De maximum-rek in de uiterste vezels van de staaf wordt, voorzover uit de foto's van het rekverloop is te bepalen, steeds in dezelfde tijd bereikt, en wel in 16 millisec.

De grootte van de maximum-rek in de uiterste vezels ligt tussen een minimum van 1355 μ -rek en een maximum van 9700 μ -rek. De gemiddelde reksnelheid voor de uiterste vezels ligt dus tussen een minimum van 8,5%/sec en een maximum van 60%/sec. De reksnelheid verandert bovendien lineair met de afstand tot de staafas. De reksnelheid is bij deze proeven dus geenszins een constant gegeven. De oplooptijd van de belasting is dat wel, vandaar, dat over de weerstand bij snel belasten wordt gesproken.

Voor de berekening van de vloeispanningen uit de gemeten rekken zijn de volgende aannames gedaan:

1. In een staafdoorsnede neemt de rek lineair met de afstand tot de neutrale lijn toe.
2. De spanningen zijn, zolang de rekken elastisch zijn, uit de rekken te berekenen met de statische waarde voor de elasticiteitsmodulus $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$.
3. De vloeispanningen in de onderste en bovenste staafhelft zijn niet gelijk. Het spanningsdiagram van de doorsnede bestaat uit rechte takken.
4. Tijdens belasten en ontlasten treedt nooit een normaalkracht op.
5. Bij het ontlasten bestaat tussen de spanningen en de rekken het statische elastische verband.

De kleine restrekken, die optreden als alleen de uiterste vezel is gaan vloeien, waren niet nauwkeurig te meten. Voor de berekening van de vloeispanning is daarom steeds uitgegaan van een belasting, waarbij belangrijke restrekken werden gemeten, waarop de toevallige meetfouten minder invloed hebben.

De keuze van de belastingspulsen, die voor de berekening van de verhoogde vloeispanningen worden gebruikt, is gemaakt aan de hand van de fig. 31b (blz.A-20).... 36b (blz.A-28).

In fig. 37a,b,c (blz. A-29) zijn de rek- en spanningsdiagrammen geschetst, waarvan de vorm overeenkomt met de opgestelde aannames. In fig. 37a zijn de rekken aangegeven, die bij de berekening een rol spelen. Onbelast en ongekromd is de staaf alleen voor het monteren in de beproevingsapparaat. Bij het monteren worden delen van de constructie aan de staaf opgehangen, waarvan het eigengewicht overeenkomt met een statische belasting P_{stat} in de dynamometer. De grootte van P_{stat} is berekend op 75 kgf, welke waarde niet werd nagemeten. De door P_{stat} veroorzaakte rek in de uiterste vezels van de meetdoorsnede volgt uit:

$$\epsilon_{stat} = \frac{\frac{1}{2} \times 27,5 \times 75}{2,1 \times 10^6 \times Bh^2/6} \cdot 10^6 = \frac{2946}{Bh^2} \mu\text{-rek}$$

Na alle voorgaande belastingspulsen zijn de rest-rekken ten opzichte van de statische rekken $\Delta\epsilon_{bv}$ en $\Delta\epsilon_{ov}$.

De aanwezige rekken voor de puls vormen het nulpunt voor de registratie van de rekken tijdens de puls, waarvan de maxima zijn ϵ_{bg} en ϵ_{og} .

Van deze twee werd òf de som òf ϵ_{og} werkelijk geregistreerd. De rekken na de puls bedragen ten opzichte van de statische rekken ϵ_{bn} en ϵ_{on} , welke beiden werden gemeten.

In fig. 37b zijn de rekken ten opzichte van de onbelaste toestand uit de rekken van fig. 37a in de vorm gebracht, waarmee verder zal worden gerekend. Essentiëel voor de mogelijkheid om met de metingen iets te kunnen berekenen, is daarbij, dat als gevolg van de gedane aannames, bij het ontlasten de rek boven en onder met eenzelfde bedrag afneemt.

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu is: } \Delta\epsilon_b &= \epsilon_{stat} + \Delta\epsilon_{bn} \quad \text{en} \quad \Delta\epsilon_o = \epsilon_{stat} + \Delta\epsilon_{on} \\ \epsilon_b &= \epsilon_{stat} + \Delta\epsilon_{bv} + \epsilon_{bg} \quad \text{en} \quad \epsilon_o = \epsilon_{stat} + \Delta\epsilon_{ov} + \epsilon_{og} \end{aligned} \right\} \quad (6.1.a)$$

$$\epsilon_e = \epsilon_b - \Delta\epsilon_b = \epsilon_o - \Delta\epsilon_o, \text{ waaruit volgt als werd gemeten:}$$

$$\left. \begin{aligned} (\epsilon_{bg} + \epsilon_{og}) : \epsilon_b &= \epsilon_{stat} + \frac{1}{2} (\Delta\epsilon_{bv} + \Delta\epsilon_{ov}) + \frac{1}{2} (\epsilon_{bg} + \epsilon_{og}) + \frac{1}{2} (\Delta\epsilon_b - \Delta\epsilon_o) \\ \epsilon_{og} : \epsilon_b &= \epsilon_o + \Delta\epsilon_b - \Delta\epsilon_o \end{aligned} \right\} \quad (6.1. b)$$

Uit het rechtlijnige rekdiagram volgt voor de ligging van de neutrale lijn bij de maximale kromming

$$c = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_b + \varepsilon_0} h \quad (6.1.c)$$

Uit het spanningsdiagram volgt:

$$\sigma_{vo} = E \cdot \varepsilon_0 \frac{b}{h-c} \quad \text{en} \quad \sigma_{vb} = \frac{a}{b} \cdot \sigma_{vo} \quad (6.1.d)$$

De waarden van a en b volgen uit evenwichtsvoorwaarden:

$$N = 0 \text{ geeft: } a = c - \left[(b+c)^2 - 2bh \right]^{1/2} \quad (6.1.e)$$

$M_{\text{max. bel.}} = M_{\text{el. ontl.}}$ geeft na invullen van de formule voor a:

$$3bh^2 - (b+c)^3 + \left[(b+c)^2 - 2bh \right]^{3/2} = (h-c) h^2 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \quad (6.1.f)$$

De waarde van b moet uit (6.1.g) door proberen worden opgelost. Daarna zijn de waarden van de dynamische vloeispanningen eenvoudig te berekenen. De resultaten van dergelijke berekeningen voor de vloeispanningen zijn in tabel 10 (blz. A-40) opgenomen. Tevens zijn de verhoudingen tussen de dynamische vloeispanningen onder en boven en de gemiddelde waarde voor de "statische" onderste vloeigrens aan de beide uiteinden van iedere proefstaaf in deze tabel opgenomen. Voor de invloed van het snel belasten op de vloeispanning worden op deze manier waarden gevonden, die variëren van 11% verlaging tot 43% verhoging.

Voor enkele staven werd behalve bij de kleinste geschikte waarde voor de blijvende rekken ook bij veel grotere waarden van de restrekken de verhoging berekend. Voor eenzelfde staaf blijkt, dat de verhogingen boven en onder nu belangrijk van die bij kleine restrekken afwijken.

De gemiddelde verhoging van boven en onder blijkt vrijwel gelijk te zijn. Voor de gemiddelde verhoging van de vloeispanning boven en onder bij kleine restrekken blijkt het verschil tussen de waarnemingen van de verschillende staven aanzienlijk geringer te zijn. De gemiddelde verhoging varieert tussen 4,5% en 25,0%. Het gemiddelde voor alle staven is daarbij 17,5% verhoging.

De vloeispanningen, die bij kleine restrekken werden berekend, zijn alle bij ongeveer dezelfde reksnelheid bij het uitvloeien bepaald.

Verwijzend naar hetgeen in hoofdstuk 1.3 over de ontwikkeling van het dynamische plastische scharnier werd gezegd, kan worden gesteld:

Er wordt alleen restrek gemeten als de rek in de uiterste vezel na het bereiken van de rek behorend bij de statische bovenste vloeigrens langer blijft toenemen dan de vloeivertraging duurt. Na afloop van de vloeivertraging wordt de grootte van de vloeispanning bepaald door het verband tussen de reksnelheid bij het uitvloeien en de verhoging van de onderste vloeigrens. De reksnelheid blijft, zoals uit de registraties blijkt (zie fig. 29 en 30 op blz. A-19), ongeveer van dezelfde grootte tot rekken, die iets lager zijn dan de toprekken. Vervolgens neemt de reksnelheid af tot de waarde nul bij het bereiken van de toprekken. In de top van het rekverloop is de spanning in het gevloeide gedeelte, dat bij kleine restrekken vanaf de buitenkant tot $1/4$ à $1/3$ van de halve staafhoogte beslaat, niet meer ten opzichte van de statische onderste vloeispanning verhoogd. Vanaf het moment, dat de reksnelheid begint af te nemen, terwijl de rek nog toeneemt, ontstaat er door de niet elastische spanningsafname een bijdrage in de restrek. Zowel voor de restrek als voor de toprek werden hierdoor bij de berekeningen van de vloeispanningen op het moment, dat de reksnelheid nog vrijwel zijn maximum waarde had, iets te hoge waarden gebruikt. Beide effecten compenseren elkaar, zodat de fout in de berekende vloeispanningen gering is zolang het vloeigebied niet te ver de staaf is ingedrongen (zie ook hoofdstuk 6.4). De grootste reksnelheden zijn voor die berekeningen, waarbij werd uitgegaan van een grootte waarde van de restrekken, aanzienlijk hoger dan bij kleine restrekken. Te verwachten was dan ook, dat de gemiddelde verhogingen bij grote restrekken hoger zouden zijn, dan bij kleine restrekken. Dat dit volgens de berekende waarden in tabel 10 niet het geval lijkt te zijn, is vermoedelijk te wijten aan het feit, dat de gemeten toprekken en restrekken een niet juist beeld geven van het spanningsdiagram op het moment, dat de reksnelheid begint af te nemen, en dat in dit geval de fouten elkaar onderling niet meer voldoende compenseren.

6.2 Berekening van de weerstand uit het elastisch ontlastende moment.

Het ontlasten na het bereiken van de maximale belasting kan, evenals in hoofdstuk 6.1 werd gedaan, als elastisch verlopend worden aangenomen, waarbij de maximale rekken in de uiterste vezels afnemen met eenzelfde elastische rek ε_e , welke volgt uit:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{2} (\varepsilon_b + \varepsilon_o) - \frac{1}{2} (\Delta\varepsilon_b + \Delta\varepsilon_o)$$

In tegenstelling met hetgeen aan het eind van hoofdstuk 6.1 over de vloeipuntsverhoging werd opgemerkt, compenseren bij de berekening van de elastische rek bij het ontlasten, de onjuistheden in de bepalingen van de rek en de restrek, behorend bij de maximale weerstand, ontstaan door hiervoor de toprek en de totale blijvende rek te gebruiken, elkaar vrijwel volledig. Dit betekent, dat het maximale belastende moment goed uit het elastische ontlastende moment kan worden berekend. Dan is:

$$M_{\text{max bel.}} = \frac{1}{6} Bh^2 E \varepsilon_e = \frac{2,1}{12} Bh^2 [(\varepsilon_b + \varepsilon_o) - (\Delta\varepsilon_b + \Delta\varepsilon_o)]$$

De weerstand R van de staaf wordt hier berekend als de grootste statische kracht, die in de dynamometer zou moeten worden aangebracht om het maximale moment in de meetdoorsnede bij een bepaalde puls op te wekken.

Uit het belastingsschema van de staaf (zie fig. 22 blz.A-15) volgt dan:

$$R = \frac{2 M_{\text{max bel.}}}{27,5} \text{ kgf}$$

De waarden van het maximum belastende moment en van de staafweerstand zijn in tabellen 4-9 (blz.A-34-A-39) berekend. De aldus bepaalde staafweerstand is in de fig. 31c - 36c (blz. A-21 - A-28) uitgezet tegen de som van de maximale rekken in de uiterste vezels behorend bij de beschouwde belastingspuls. (De meetpunten voor deze weerstandsbepaling zijn aangeduid met cirkels).

6.3 Berekening van de weerstand uit de respons op het gemeten krachtverloop in de dynamometer.

In fig. 35 (blz. A-27) is het gedeelte van de constructie, dat door de dynamometerkrachten wordt belast, schematisch in de vorm van een gedempt massaveersysteem weergegeven. Daarnaast is het krachtverloop in de dynamometer geschetst. Het krachtverloop is daarbij in overeenstemming met hetgeen daarover in hoofdstuk 5.3 werd gezegd uit twee harmonische componenten met een constante amplitude-verhouding opgebouwd. Het gaat hier om het bepalen van de grootste weerstand, die volgens het gemeten krachtverloop bij een puls is voorgekomen. De amplitude-verhouding nabij de top van het gemeten krachtverloop is daarbij dus van belang. Het samenstellen van de twee componenten laat zien, dat, wanneer het krachtverloop in de top goed wordt weergegeven, bij het begin van het dynamisch belasten een belangrijke afwijking tussen de werkelijkheid en het schema bestaat (vergelijk fig. 35 blz. A-27 met fig. 29 en 30 blz. A-19). Een berekening van de respons op het werkelijk gemeten krachtverloop, waarin ook het eventuele effect van spelingen en het effect van het vloeien van de proefstaaf tot uitdrukking komen, is mogelijk met behulp van tragsgewijze integratie-processen. Deze processen brengen veel rekenwerk mee en zijn om die reden hier niet toegepast.

In fig. 28 (blz. A-19) is het resultaat van een frequentie-meting voor het door de dynamometer belaste systeem weergegeven. Hieruit en uit nog twee van dergelijke registraties werd voor de eigenperiode van het belaste systeem bepaald: $T = 10,4 \times 10^{-3}$ sec ($\omega = 604$ rad/sec), welke waarde iets hoger ligt dan de berekende waarde. Aangenomen wordt, dat de afwijking wordt veroorzaakt door een niet geheel juiste berekening van de aequivalente massa. Met de in (5.2) berekende waarde van de veerstijfheid ($k = 3,06 \times 10^6$ N/m) en de gemeten waarde voor de periode T wordt nu voor de aequivalente massa berekend:

$$m_e = k \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 = 3,06 \times 10^6 \times \left(\frac{10,4 \times 10^{-3}}{2\pi} \right)^2 = 8,4 \text{ kg} \quad (6.3.a)$$

De critische viskeuze damping voor het aequivalente systeem c_{cr} is:

$$c_{cr} = 2 m_e \omega = 2 \times 8,4 \times 604 = 10130 \text{ kg/sec} \quad (6.3.b)$$

Uit de afname van de amplitude, zoals deze uit fig. 28 blijkt, is bij geheel viskeuze demping voor de waarde van deze demping c te berekenen:

$$c = \frac{2m}{T \lg e} \lg \frac{ij_{t+T}}{ij_t} = - \frac{2 \times 8,4}{10,4 \times 10^{-3}} \frac{\lg 0,7}{\lg e} = 575 \text{ kg/sec} \quad (6.3.c)$$

De demping is zeer klein ten opzichte van de critische waarde en in dat geval heeft de demping geen invloed op de periode. Wanneer plastische vervormingen optreden is de veer niet meer zuiver elastisch. Een deel van de aan het systeem door de kracht afgegeven arbeid wordt opgenomen als plastische vormveranderingsarbeid. Dit komt neer op het toenemen van de demping. Het effect hiervan is verder buiten beschouwing gelaten, hetgeen ertoe kan leiden, dat bij grote plastische vervormingen een iets te hoge waarde voor de weerstand zal worden berekend.

Het krachtverloop is te omschrijven met:

$$P_t = P_1 \sin \Omega_1 t - P_2 \sin \Omega_2 t \quad (6.3.d)$$

Hierin is: $P_2 = \alpha P_1$ en $P_{dm} = P_1 + P_2$ en dus is:

$$P_1 = \frac{P_{dm}}{1+\alpha} = P_{dm} \text{ gereduceerd} \quad \text{en} \quad P_2 = \frac{\alpha P_{dm}}{1+\alpha} \quad (6.3.e)$$

Door opmeten is uit de krachtregistraties voor de periodes van de beide componenten van de kracht T_1 en T_2 bepaald:

$$\frac{1}{4} T_1 = 16 \times 10^{-3} \text{ sec}; \quad T_1 = 64 \times 10^{-3} \text{ sec}; \quad \Omega_1 = 98,2 \text{ rad/sec}$$

$$\frac{23}{4} T_2 = \frac{1}{4} T_1 \quad ; \quad T_2 = 2,8 \times 10^{-3} \text{ sec}; \quad \Omega_2 = 2258 \text{ rad/sec}$$

De weerstand van de veer volgt uit de uitbuiging ij_t behorende bij P_t met $R_t = k \cdot ij_t$, zodat R_t volgt uit:

Uit de afname van de amplitude, zoals deze uit fig. 28 blijkt, is bij geheel viskeuze demping voor de waarde van deze demping c te berekenen:

$$c = \frac{2m_e}{T \lg e} \lg \frac{ij_{t+T}}{ij_t} = - \frac{2 \times 8,4}{10,4 \times 10^{-3}} \frac{\lg 0,7}{\lg e} = 575 \text{ kg/sec} \quad (6.3.c)$$

De demping is zeer klein ten opzichte van de critische waarde en in dat geval heeft de demping geen invloed op de periode. Wanneer plastische vervormingen optreden is de veer niet meer zuiver elastisch. Een deel van de aan het systeem door de kracht afgegeven arbeid wordt opgenomen als plastische vormveranderingsarbeid. Dit komt neer op het toenemen van de demping. Het effect hiervan is verder buiten beschouwing gelaten, hetgeen ertoe kan leiden, dat bij grote plastische vervormingen een iets te hoge waarde voor de weerstand zal worden berekend.

Het krachtverloop is te omschrijven met:

$$P_t = P_1 \sin \Omega_1 t - P_2 \sin \Omega_2 t \quad (6.3.d)$$

Hierin is: $P_2 = \alpha P_1$ en $P_{dm} = P_1 + P_2$ en dus is:

$$P_1 = \frac{P_{dm}}{1+\alpha} = P_{dm} \text{ gereduceerd} \quad \text{en} \quad P_2 = \frac{\alpha P_{dm}}{1+\alpha} \quad (6.3.e)$$

Door opmeten is uit de krachtregistraties voor de periodes van de beide componenten van de kracht T_1 en T_2 bepaald:

$$\frac{1}{4} T_1 = 16 \times 10^{-3} \text{ sec}; \quad T_1 = 64 \times 10^{-3} \text{ sec}; \quad \Omega_1 = 98,2 \text{ rad/sec}$$

$$\frac{23}{4} T_2 = \frac{1}{4} T_1 \quad ; \quad T_2 = 2,8 \times 10^{-3} \text{ sec}; \quad \Omega_2 = 2258 \text{ rad/sec}$$

De weerstand van de veer volgt uit de uitbuiging ij_t behorende bij P_t met $R_t = k \cdot ij_t$, zodat R_t volgt uit:

$$R_t = k e^{-\frac{c}{2m}t} (c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t) + P_1 \frac{\sin(\Omega_1 t - \varphi_1)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega_1}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2c}{c_{cr}} \frac{\Omega_1}{\omega}\right)}} -$$

$$- P_2 \frac{\sin(\Omega_2 t - \varphi_2)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega_2}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2c}{c_{cr}} \frac{\Omega_2}{\omega}\right)}} \quad (6.3.f)$$

waarin is:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\frac{2c}{c_{cr}} \frac{\Omega_1}{\omega}}{\left(1 - \frac{\Omega_1^2}{\omega^2}\right)^2} \quad \text{en} \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\frac{2c}{c_{cr}} \frac{\Omega_2}{\omega}}{\left(1 - \frac{\Omega_2^2}{\omega^2}\right)^2}$$

Na invullen van de verschillende grootheden in (6.3.f) en het berekenen van de constanten c_1 en c_2 uit de beginvoorwaarden bij $t = 0$ volgt voor het weerstandsverloop:

$$R_t = \frac{P_{dm}}{1+\alpha} \left[(0,0194 + 0,025\alpha) e^{-34,3t} \cos 604t + (0,1679 - 0,2893\alpha) e^{-34,3t} \sin 604t \right]$$

$$+ \frac{P_{dm}}{1+\alpha} \left[1,0267 \sin(98,2t - 0,018) - 0,075\alpha \sin(2258t + \pi - 0,033) \right] \quad (6.3.g)$$

Het maximum voor R_t volgens (6.3.g) moet door proberen worden gevonden. De grootste weerstand R treedt op als $t = 15,3$ sec en is:

$$R = P_{dm} \frac{1,0295 - 0,0324 \alpha}{1 + \alpha} \quad (6.3.h)$$

Het bepalen van α uit de registraties van het krachtverloop kan niet met grote nauwkeurigheid worden uitgevoerd. Redelijk goed is $\alpha = 0,1$, waarmee dan voor R volgt:

$$R = P_{dm} \frac{1,0295 - 0,0032}{1,1} = 0,91 P_{dm} \quad (6.3.j)$$

De weerstand R berekend volgens (6.3.j) is eveneens in de tabellen 4-9 (blz. A-34- A-39) opgenomen en vervolgens uitgezet in de fig. 31^c - fig. 36^c (blz. A-21-A-29). Door de met driehoekjes aangegeven meetpunten zijn weer gemiddelde krommen getrokken. Deze krommen zijn met die voor de weerstand berekend met het elastisch ontlastende moment, uit de gemeten rekken en restrekken en met die voor de statische weerstand te vergelijken. De statische weerstand is daarbij berekend met behulp van de gemiddelde waarde van de onderste vloeispanningen, verkregen uit de materiaalproeven vermeld in tabel 2a (blz. A-32). De berekende dynamische weerstanden zijn de waarden ten opzichte van de reeds aanwezige statische belasting

$P_{stat} = 75$ kg. Van de totale weerstand bij statisch belasten moet dus om te kunnen vergelijken 75 kg worden afgetrokken.

Het blijkt nu, dat de beide berekende krommen voor de dynamische weerstand redelijk met elkaar overeenstemmen. Tevens blijkt, dat de weerstand tegen snel belasten belangrijk hoger is dan de weerstand tegen statisch belasten (zie tabel 3 blz. A-33).

6.4. Berekening van de weerstand uit het rekverloop en de vloeipuntsverhogingen voor een snelle belasting, waarmee grote blijvende vervormingen worden opgewekt.

De laatste belastingspuls op alle staven was steeds zodanig, dat grote blijvende vervormingen werden opgewekt. Van het rekverloop bij de laatste pulsen werd voor de staven no. 5, 7, 8 en 9 een volledige registratie verkregen. De berekening van de weerstand uit het rekverloop is hier alleen voor staaf no.8 uitgevoerd. Fig. 30 (blz. A-19) geeft de registratie van puls 13 op staaf no.8, de puls waarbij de grote blijvende vervormingen bij staaf no.8 werden opgewekt. In fig. 36 (blz. A-28) is het rekverloop van fig. 30 op een grotere schaal weergegeven tot even voorbij het punt waar de grootste rek is opgetreden. In fig. 36 zijn de kleine oneffenheden in het rekverloop weggelaten, terwijl tevens de tijdschaal ten opzichte van de rekschaal is vergroot om een beter beeld te krijgen. Bij staaf no.8 werd het verloop van de som van de rekken in de bovenste en onderste vezels gemeten ten opzichte van de reeds aanwezige rekken bij het begin van het belasten, welke door de statische belasting en de voorafgaande dynamische belastingen zijn veroorzaakt.

Om uit de gemeten rekken de weerstand te kunnen berekenen volgens de in hoofdstuk 1.3 aangegeven methode, zijn de volgende aannames nodig:

1. Op ieder tijdstip tijdens het dynamisch belasten zijn de rekken onder en boven gelijk. In fig. 36 is daarom de helft van de gemeten som van de rekken boven en onder als rek voor een van de uiterste vezels uitgezet.
2. Als blijvende rek voor één van de uiterste vezels kan de gemiddelde waarde van de restrek boven en onder na de voorgaande belastingen worden genomen. Dan is $\Delta \epsilon = \frac{1}{2}(\Delta \epsilon_{bv} + \Delta \epsilon_{ov}) + \epsilon_{stat} = 1697 + 153 = 1850 \mu\text{-rek}$.
3. Tijdens het ontlasten bij de voorafgaande puls en het opnieuw belasten tot de toprek van de voorafgaande puls ($\epsilon_{v.v} = \frac{1}{2}(\epsilon_b + \epsilon_o) = 3890 \mu\text{-rek}$) bestaat tussen spanningen en rekken het statische lineaire verband ($E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$).
4. Het verband tussen de reksnelheid bij het uitvloeien en de vloeipuntsverhoging is niet afhankelijk van reeds eerder opgewekte blijvende vervormingen. Voor het bepalen van dit verband zijn de gegevens van Wood en Clark voor Mild Steel (materiaal 7 van tabel 1) als grondslag genomen. Op enkel logaritmische schaal is dit verband lineair (zie fig. 3 (blz. A-1) en fig. 37 (blz. A-29)). Aangenomen is, dat er voor het onderzochte materiaal eveneens een lineair verband tussen de reksnelheid bij het uitvloeien en de vloeipuntsverhoging bestaat, wanneer deze grootheden op dezelfde wijze worden uitgezet als de gegevens van Wood en Clark. Verder is aangenomen, dat de reksnelheid, waarbij geen vloeipuntsverhoging meer optreedt, voor beide beschouwde materialen gelijk is (zie fig. 3). Het tweede punt van de rechte is gevonden door het gemiddelde van de vloeipuntsverhogingen van boven- en onderkant, dat in tabel 10 voor puls 5 op staaf no.8 werd berekend, uit te zetten tegen de reksnelheid, waarbij de weerstand voor het laatst zijn maximale waarde heeft. In het volgende zal de betekenis van deze omschrijving duidelijk worden. In fig. 37 is de grafiek voor de vloeipuntsverhoging aangegeven, die voor de volgende berekening zal worden gebruikt.
5. Het spanningsdiagram is op ieder tijdstip symmetrisch. Er wordt dus aangenomen, dat de verhoging van de vloeispanning boven en onder gelijk is en dat de verhoogde spanningen kunnen worden berekend uit de gemiddelde waarde van de statische onderste vloeigrens voor de vier trekproeven, die op het materiaal van de staaf werden verricht. ($\sigma_{ov}^* = 2706 \text{ kgf/cm}^2$). Voor de eenvoud is bovendien aangenomen, dat

het spanningsdiagram uit rechte takken bestaat met in het vloeigebied overal dezelfde spanningen. Nodig is deze laatste aanname niet. Het rekenwerk wordt hierdoor echter belangrijk vereenvoudigd, terwijl volgens de litteratuur-gegevens de invloed van deze vereenvoudiging op de berekende weerstand gering is (8.9). De vorm van het spanningsdiagram komt dus overeen met die van fig. 34c (blz. A-26) als $c = 0$.

De berekening van de weerstand uit het rekverloop is voor het onderzochte geval uitgevoerd in tabel 11 (blz. A-41). In de eerste kolom zijn de waarden van de rek (ε_t) vermeld, waarbij de reksnelheid in fig. 36 werd afgelezen. De totale rek voor een uiterste vezel is daarbij:

$$\varepsilon_{u.v.} = \Delta\varepsilon + \varepsilon_t = 1850 + \varepsilon_t \mu_{rek} \quad (6.4.a)$$

De waarde van a voor het spanningsdiagram volgt uit:

$$a = \frac{\sigma_{o.v.} h}{2 E \varepsilon_{u.v.}} \quad (6.4.b)$$

De weerstand wordt met de in tabel 3 gegeven afmetingen van de meetdoorsnede berekend met:

$$R = \frac{4}{55} M = \frac{4}{55} \left(\frac{1}{4} B h^2 - \frac{1}{3} B a^2 \right) \sigma_{ov} = (0,3496 - 0,0291 a^2) \sigma_{ov} \quad (6.4.c)$$

De waarden van tabel 11 geven de totale weerstand van de staaf. Deze bedraagt volgens deze berekening voor puls 13 maximaal $R = 1158$ kgf.

Berekend met het maximum van het krachtverloop in de dynamometer is de maximum weerstand bij puls 13: $R = 1165 + 75 = 1240$ kgf.

Gezien de vele aannames, die in de beide methodes voor de berekening van de staafweerstand moesten worden gedaan, is de overeenstemming tussen de resultaten van beide methodes bevredigend.

In fig. 32 is de weerstandskromme bij het ontstaan van grote plastische vervormingen, zoals die in tabel 11 werd berekend, naast de andere weerstandskrommes opgenomen, waarbij moet worden opgemerkt, dat deze kromme niet met de andere krommen voor de dynamische weerstand vergelijkbaar is.

7. Conclusies.

I. De beproevingsapparatuur.

1. De mechanische apparatuur heeft in het algemeen volgens de verwachtingen gewerkt. De invloed van het optreden van storingen in het krachtsverloop, doordat bij het aanslaan van het belastingssysteem storende massakrachten worden opgewekt, werd bij het ontwerp niet nagegaan. De storende massakrachten bleken bij de metingen van grote invloed, waarbij de invloed het grootst bleek, wanneer in de plaats van de proefstaaf een veel stijvere bevestiging voor de dynamometer werd aangebracht. Bij het uitvoeren van zuivere trekproeven zou deze stijve bevestiging van de trekstang moeten worden toegepast. De storingen in het krachtsverloop van een snel opgebrachte belasting, die zeer moeilijk te onderdrukken zijn, maken het dan onmogelijk snel een "constante" belasting aan te brengen. Het is daarom met deze apparatuur niet mogelijk zuivere trekproeven voor het bepalen van de vloeivertraging en de reksnelheid bij het uitvloeien uit te voeren.
2. Het maximum van een snel opgebrachte belasting is bij de gebruikte apparatuur begrensd tot een waarde van circa 1500 kgf.
Voor het opwekken van snelle belastingen met een hogere maximum-waarde moet de apparatuur aanzienlijk zwaarder worden gemaakt, waardoor ze moeilijk hanteerbaar wordt. Met mechanische systemen zijn daarom alleen snelle buigproeven op kleine modellen uitvoerbaar.
3. De mogelijkheid tot het variëren van de oplooptijd van de belasting is voor de apparatuur gering. (Min. = 9,7 millisec, max. = 27 millisec.)
4. Daar aan het toegepaste systeem van het opwekken van snel oplopende belastingen veel bezwaren kleven, verdient het aanbeveling bij voortzetting van het onderzoek met snel oplopende belastingen over te gaan op het gebruiken van andere beproevingsapparatuur, waarbij vooral de in (12) beschreven apparatuur goed aan de te stellen eisen voldoet.

II. Het uitvoeren van de metingen.

5. De gebruikte meetinstrumenten en meettechnieken hebben voor het verzamelen van het beperkte aantal gegevens goed voldaan. Het meten van de verschijnselen als functies van de tijd met een extern gestarte oscilloscoop en het fotografisch vastleggen van de beelden van de oscilloscoop hebben bij de metingen goed voldaan. Wanneer voor het registreren van meer dan twee verschijnselen per proefstaaf wordt overgegaan tot het gebruik van meer dan één oscilloscoop moet een methode worden gezocht om door het aanbrengen van markeringen in de tijdsregistratie te komen tot een koppeling van de beelden van de afzonderlijke oscilloscopen (bijvoorbeeld door de startpuls voor de tijdbasis tevens te gebruiken voor het aanbrengen van een nulpunten-markering op de tijdbases). Dan zal ook de gevolgde methode van het met de hand bedienen van de sluiters van het fototoestel moeten worden vervangen door een mechanische of elektrische bediening van de sluiters.
6. Voor het vaststellen van de dynamische materiaal-eigenschappen zijn buigproeven niet geschikt. Hiervoor zullen dynamische trekproeven moeten worden uitgevoerd, waarbij het krachtsverloop weer met een dynamometer kan worden gemeten en waarbij het rekverloop met dynamische rekmeetapparatuur moet worden gevolgd.
7. Het aantal waarnemingen per dynamische belasting is bij de proeven het minimum geweest, dat voor het vaststellen van de verschillende onafhankelijke grootheden nodig is. Daardoor ontbreekt de mogelijkheid om de waarnemingen onderling te vergelijken op hun juistheid. Het verdient daarom aanbeveling naast het apart meten van de restrek voor de bovenste en onderste vezels van de meetdoorsnede ook het rekverloop voor deze beide vezels apart te meten. Verder is uit de waarnemingen gebleken, dat het noodzakelijk is van het restrekdiagram meer dan twee punten te bepalen. Bij het opmeten van de restrekdiagrammen voor één van de staven in meer dan twee punten bleek, dat in de restrekken in één van de uiterste vezels een afwijking van het lineaire verloop was voorgekomen. Daar de rest-

rekken in de uiterste vezels een essentiëel gegeven vormen voor de berekening van de verhoogde vloeispanningen is het zeer gewenst een contrôle te hebben op het juist meten ervan.

Behalve het meten van het krommingsverloop door het meten van het rekverloop van de beide uiterste vezels moet het krommingsverloop ook met een in de staafas aangebrachte krommingsmeter worden gemeten om ook in het gebied van de grootte plastische vervormingen, waar de strookjes op de uiterste vezels gaan vloeien, de kromming te kunnen volgen.

Het verdient verder aanbeveling ook de verplaatsingen en de versnellingen in één of meer punten te meten, zodat krommingen en krachten langs meer dan één weg kunnen worden bepaald.

III. De meetresultaten.

8. De verhoging van de vloeispanning door het snel belasten moest worden berekend uit waarnemingen van de toprek en de restrekken in de uiterste vezels van de zuiver gebogen zône van de staaf. Restrekken waren eerst betrouwbaar te meten, wanneer een belastingspuls de staaf in een gebied van circa 0,3 van de staafhoogte tot vloeï was gebracht. De grootte van de vloeispanning wordt dan door de reksnelheid bij het uitvloeien bepaald en niet door de vloeivertraging.
9. Voor de zes staven werd bij zo klein mogelijke waarden van de restrekken een gemiddelde vloeipuntsverhoging van 17,5% boven de statische onderste vloeigrens berekend. De berekende waarden variëren daarbij van 1% verlaging tot 29% verhoging ten opzichte van de statische onderste vloeigrens.
10. Van het krachtverloop, dat met de dynamometer werd opgenomen, werd het maximum opgemeten. De grootste waarde van de weerstand, die met het gemeten maximum van het krachtverloop overeenkomt, werd berekend door de respons van het door de dynamometer belaste systeem na te gaan. De weerstand loopt op bij toename van de grootte van het maximum van een belastingspuls. Dit is in overeenstemming met het feit, dat de vloeispanningen toenemen met de reksnel-

heid en dat door een puls met een hoger maximum grotere reksnelheden bij het uitvloeien worden opgewekt.

11. De weerstand afgeleid uit het krachtverloop in de dynamometer neemt minder toe naarmate de blijvende vervormingen groter worden. Bij de grootste blijvende vervormingen, die werden opgewekt, had de weerstand vrijwel zijn maximale waarde. De weerstand tegen snel belasten was bij zes staven 19% tot 31% hoger dan de statische weerstand.
12. Bij een puls, waarmee grote blijvende vervormingen werden opgewekt, gaf een berekening van de weerstand uit het rek-verloop en met behulp van een op de waarnemingen en de litteratuurgegevens gebaseerde grafiek voor het verband tussen de vloeipuntsverhoging en de reksnelheid bij het uitvloeien, een waarde voor de maximale weerstand, die redelijk goed overeenkomt met de waarde berekend uit het maximum van de belasting op de proefstaaf.

8. Nawoord.

De resultaten van het onderzoek, welke in dit verslag werden weergegeven, moeten worden beschouwd als een eerste verkenning in het terrein van het onderzoek naar het materiaalgedrag bij snelle belasting. De uitkomsten van het beperkte proeven-programma zijn niet voldoende cohaerent om tot definitieve uitspraken te komen. Veel van het inzicht over wat tijdens de proeven goed en fout werd gedaan, is pas bij het uitwerken van de meetgegevens ontstaan. Het onderwerp ligt buiten het terrein van de problemen, waarmee ik in de voorafgaande studietijd was geconfronteerd. Het enigszins thuisraken in dit voor mij nieuwe terrein heeft mij veel inspanning en tijd gekost. Voor de steun, die ik van velen hierbij ondervonden heb, wil ik op deze plaats mijn dank uitspreken.

Prof.Ir. A.A. van Douwen, onder wiens leiding dit onderzoek werd verricht, wil ik in het bijzonder bedanken voor de grote vrijheid, die hij mij bij de uitvoering van het onderzoek heeft gelaten en voor de maatregelen, die hij steeds heeft genomen om het onderzoek zo snel als mogelijk te doen verlopen. Prof. van Douwen en het Delfts Hogeschool Fonds ben ik erkentelijkheid verschuldigd voor het verlenen van assistentschappen gedurende de gehele periode, die dit onderzoek heeft gevergd.

De heer Ir. J. de Back wil ik bedanken voor zijn hulp bij het opzetten van proeven en bij het ontwerpen van de belastingsapparatuur. Tevens ben ik de heer de Back dank verschuldigd voor de zorgvuldigheid, waarmee hij het concept van dit verslag heeft willen doorlezen. Dit heeft op veel punten na gezamenlijk overleg tot andere formuleringen geleid.

Het inrichten en toepassen van de elektronische registratieapparatuur werd geheel door de heer Jeunink verzorgd. Voor zijn hulp bij en zijn suggesties voor het uitvoeren van de metingen wil ik de heer Jeunink bedanken.

Een bijzonder woord van dank wil ik richten aan de afdeling metaalbewerking van het Stevin-laboratorium. Hun constructieve voorstellen voor het ontwerpen van de belastingsapparatuur en hun enthousiasme bij het bouwen ervan heeft het mogelijk gemaakt de gehele apparatuur in snel tempo met eigen middelen uit te voeren. Ook later bij het aan-

brengen van kleine wijzigingen of het voorbereiden van aanvullende proeven heb ik aan hun medewerking een belangrijke steun gehad.

Tenslotte wil ik tegenover allen, die door belangstelling of anderszins hebben bijgedragen tot de afsluiting van dit afstudeerwerk, mijn hartelijke dank uitspreken.

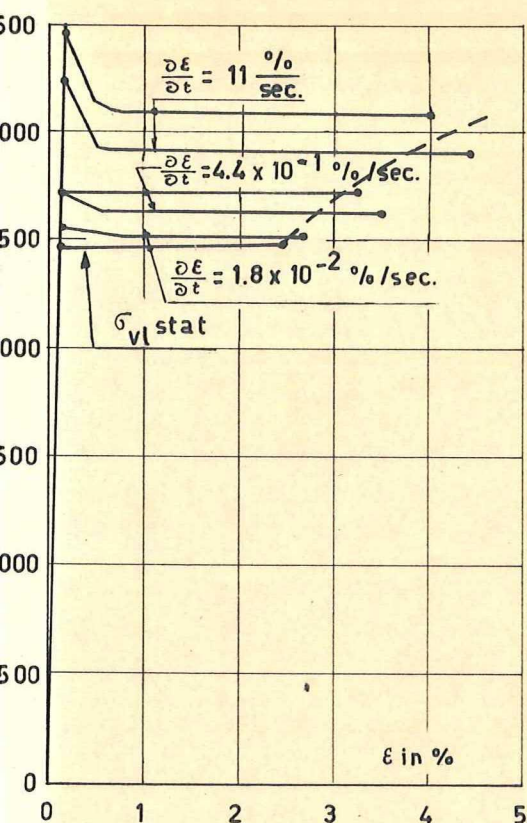
Delft, februari 1964.

J.J.P. Wolf.

9. Litteratuur.

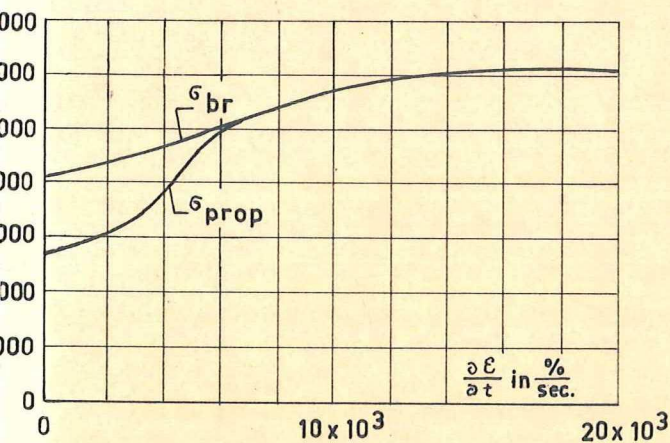
1. J.S. Rinehart
J. Pearson Behaviour of Metals under Impulsive Loading.
2. J. Miklowitz The Initiation and Propagation of the Plastic Zone in a Tension Bar of Mild Steel under Excentric Loading.
Journal of Applied Mechanics Vol. 14 1947.
3. J. Miklowitz The Initiation and Propagation of the Plastic Zone in a Tension Bar of Mild Steel as Influenced by the Speed of Stretching and Rigidity of Testing Machine.
Journal of Applied Mechanics Vol. 14 1947.
4. Th. v. Karman
P. Duwez. The Propagation of Plastic Deformation in Solids.
Journal of Applied Mechanics Vol. 21 1950.
5. D.S. Wood
D.S. Clark. The Time Delay for the Initiation of Plastic Deformation at Rapidly Applied Constant Stress.
Proc. A.S.T.M. Vol. 49 1949.
6. D.S. Wood
D.S. Clark The Influence of Temperature upon the Time Delay for Yealding in Annealed Mild Steel.
Trans. A.S.M. Vol. 43 1951.
7. D.S. Clark The Behaviour of Metals under Dynamic Loading.
Trans. A.S.M. Vol. 46 1954.
8. J.M. Massard
R.A. Collins. The Engineering Behaviour of Structural Metals under Slow and Rapid Loading.
University of Illinois 1958 S.R.S.161.

9. R.F. Wojcieszak
J.M. Massard.
Slow and Rapid Lateral Loading Test of
Simply Supported Beams and Beam-Columns.
University of Illinois 1957 S.R.S. 157.
10. J.M. Massard
Static and Dynamic Test of Steel Frame Structures into the Inelastic Range of Deformation.
University of Illinois 1957 S.R.S. 159.
11. J.M. Massard
D. Mc Donald.
An Investigation of Riveted and Bolted
Column-Base and Beam-Column Connections
under Slow and Rapid Loading.
University of Illinois 1958 S.R.S. 156.
12. W. Egger
60-Kip Capacity Slow or Rapid Loading Apparatus.
University of Illinois S.R.S 157.
13. J.W. Melin
S. Sutcliffe.
Development of Procedures for Rapid Computation of Dynamic Structural Response.
University of Illinois 1959 S.R.S. 171.
14. N.M. Newmark
A Method of Computation for Structural Dynamics.
University of Illinois 1959 S.R.S. 180.
15. C.H. Norris e.a.
Structural Design for Dynamic Loads.
Mc. Graw-Hill Book Comp. Inc. New York 1959.
16.
Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures.
Earthquake Engineering Research Institute
1952.
17.
De Ingenieur.

σ in kg/cm^2 

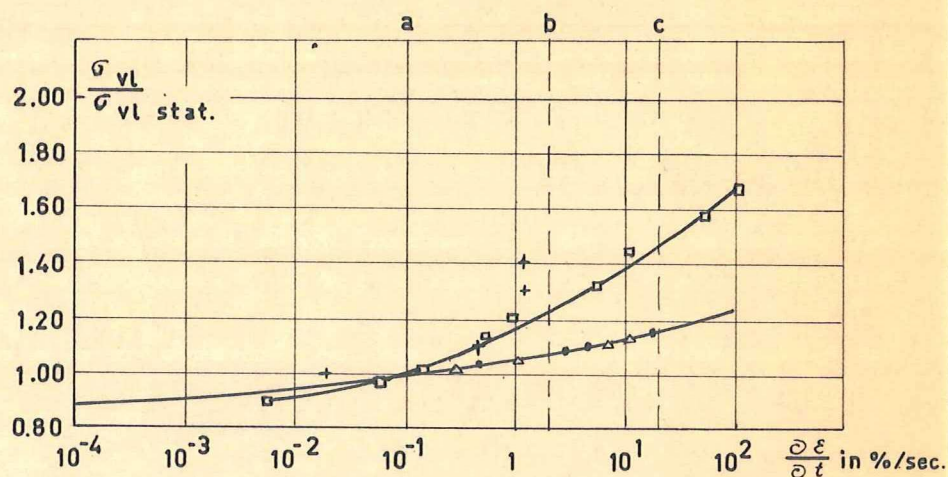
DIAGRAMMEN VOOR STAAL MET
0.02 % KOOLSTOF BIJ VERSCHILLENDE
REKSNELHEDEN

fig. 1

 σ in kg/cm^2 

EFFECT VAN DE REKSNELHEID OP DE
EVENREDIGHEIDSGRENS EN DE BREUK-
GRENS VAN STAAL MET 0.22 % KOOLSTOF

fig. 3



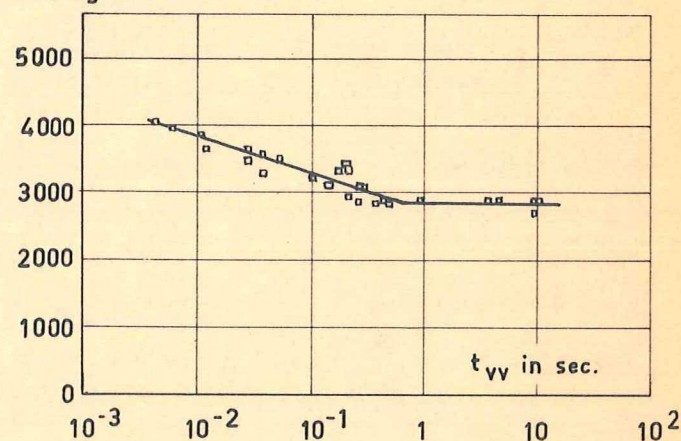
VERBAND TUSSEN VLOEISPANNING EN REKSNELHEID

- constructiestaal (vgl. Fry)
- zacht staal (vgl. Mollomon, Zener)
- △ staal met 0.2 % koolstof (vgl. Mollomon)
- + staal van fig 1, waarbij de vloeigrens bij $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = 1.8 \times 10^{-2} \text{ %/sec.}$ als statische grens is aangegeven

Bij a ligt het maximum van de reksnelheid voor statische proeven.

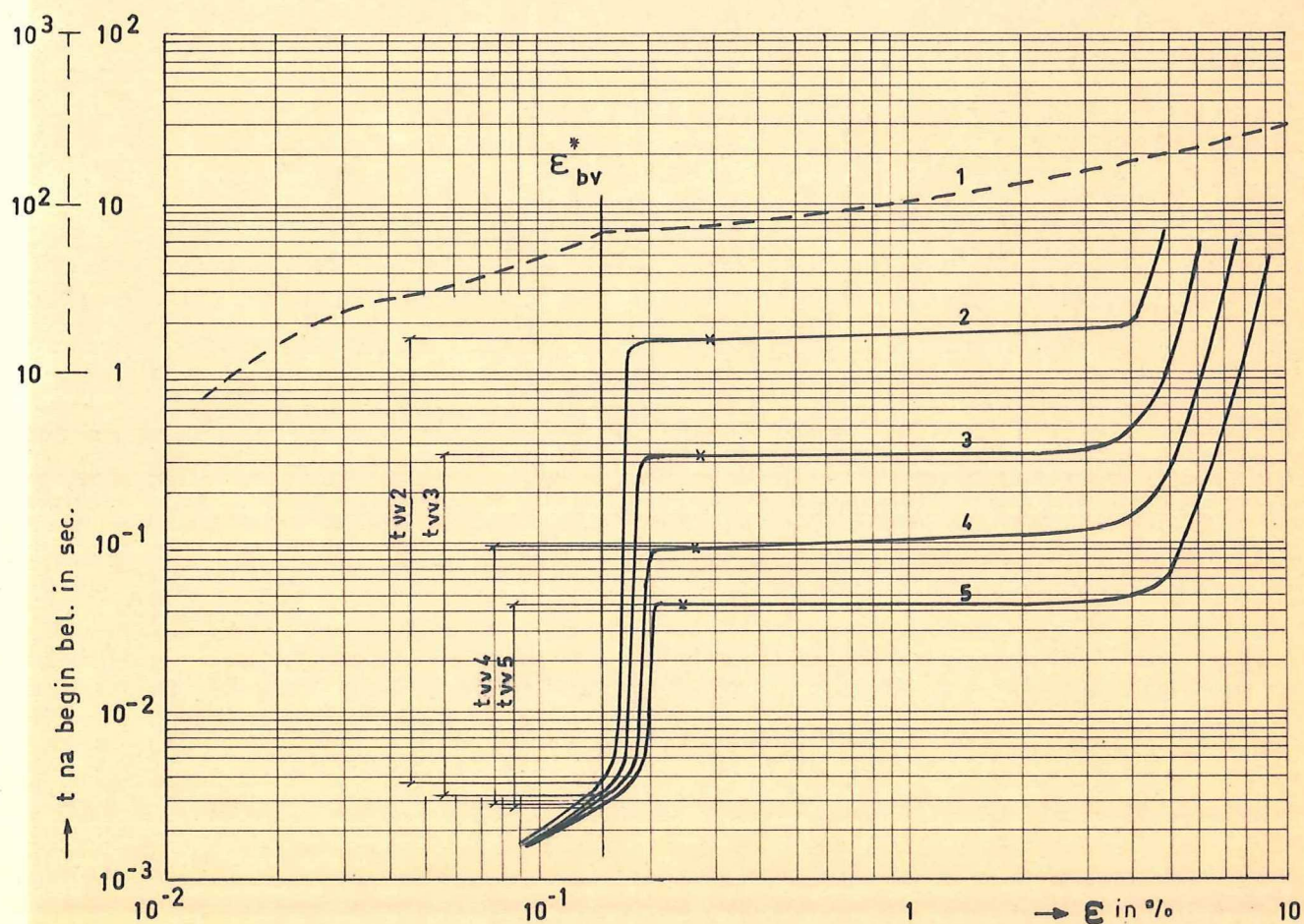
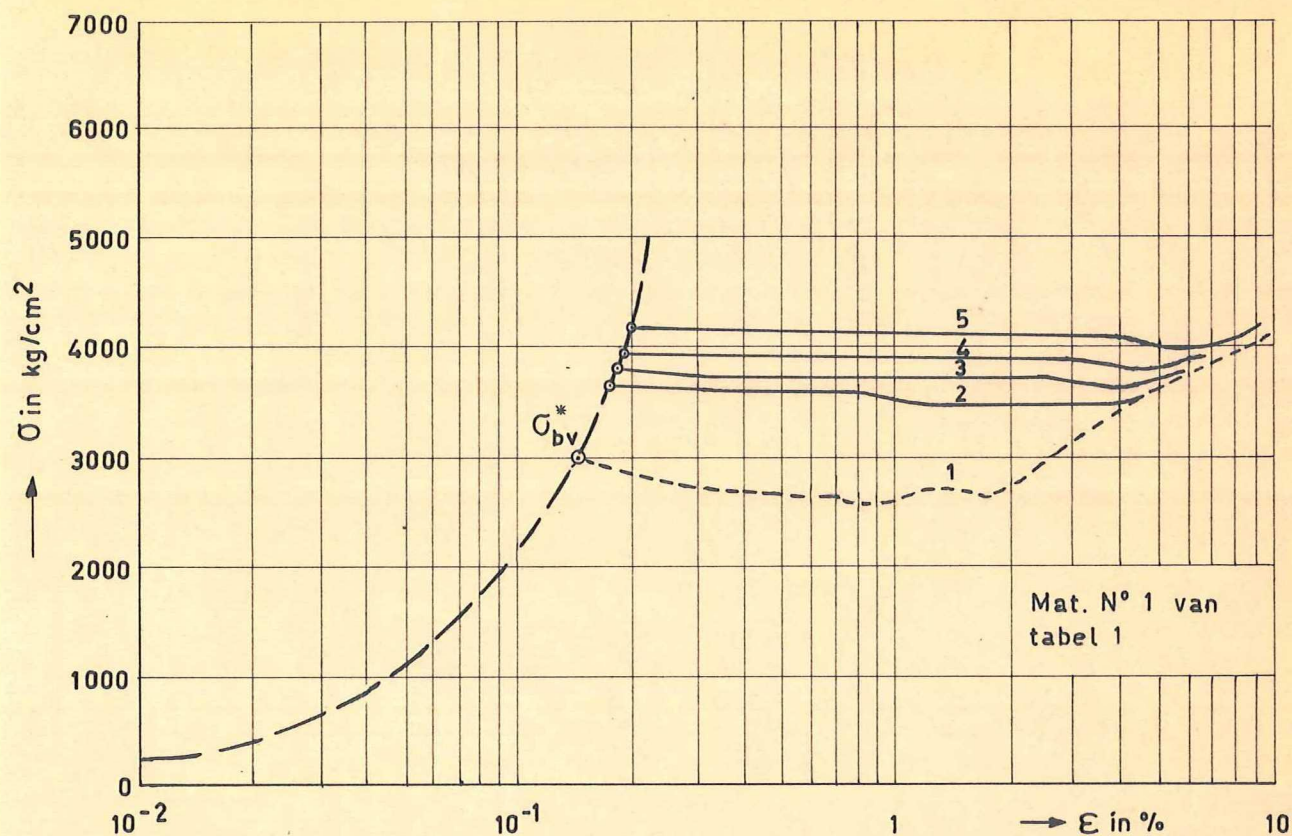
Tussen b-c liggen de reksnelheden bij dynamische belastingen

fig. 2

 σ in kg/cm^2 

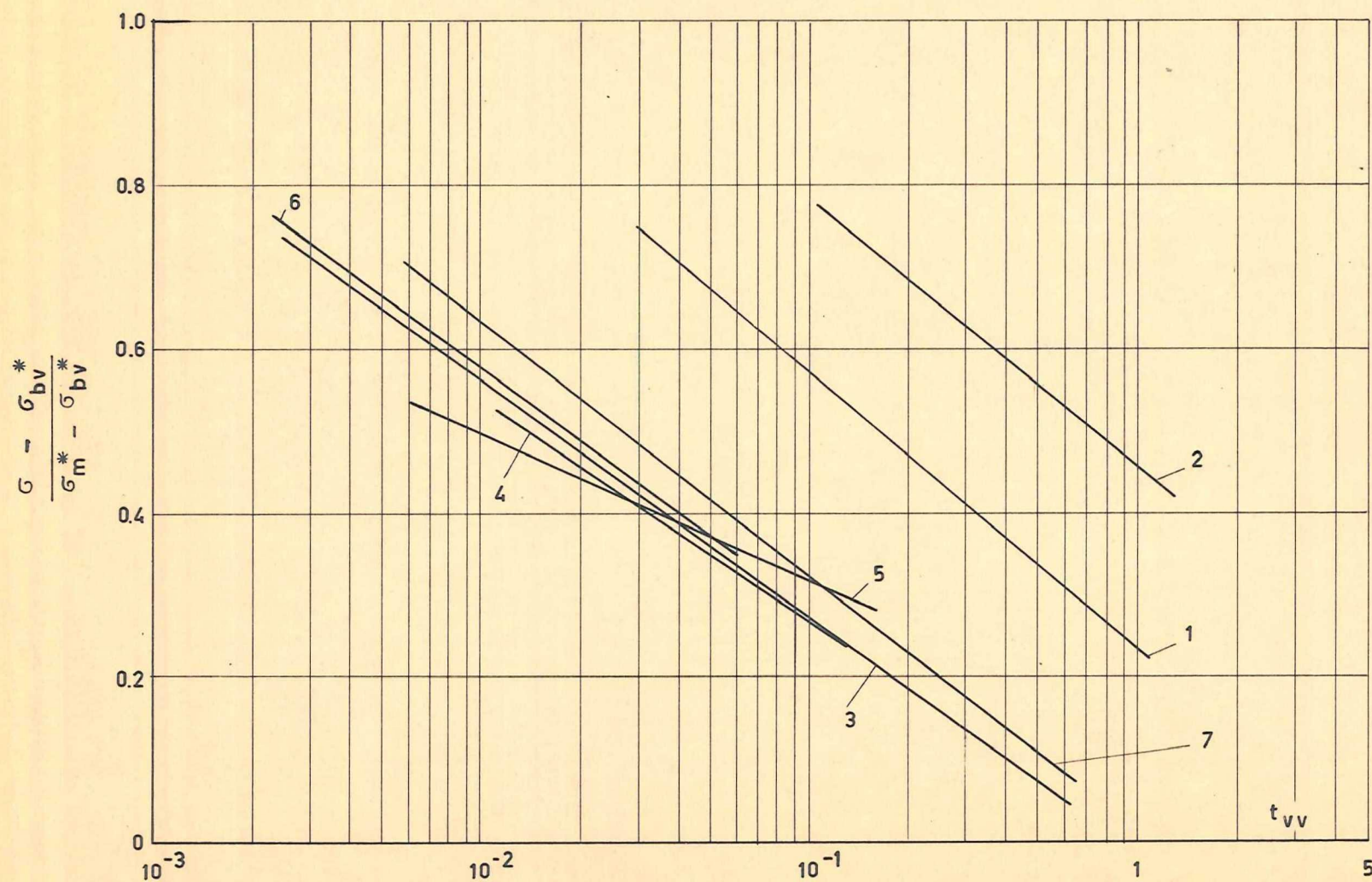
VLOEIVERTRAGING (= tijd verlopen tussen bereiken max. spanning en begin uitvloeien) i.v.m. HOOGTE OPGEBRACHTTE SPANNING MAT. N° 7 VAN TABEL 1, WAARBIJ DE SPANNING IN 5 millisec. VAN NUL NAAR CONSTANT MAX. IS OPGEVOERD.

fig. 4



SPANNINGREKDIAGRAMMEN EN REKTUDDIAGRAMMEN VOOR TREKPROEVEN, WAARBIJ DE SPANNING IN 6 millisec. TOT EEN CONSTATE WAARDE TUSSEN DE STATISCHE VLOEI - EN BREUKSPANNING IS AANGEBRACHT

fig. 5



MATERIAAL 1 - 6

t_{vv} = tijd tussen bereiken

σ_{bv}^* en moment dat

$\frac{\sigma}{\varepsilon} = 1.4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

MATERIAAL 7

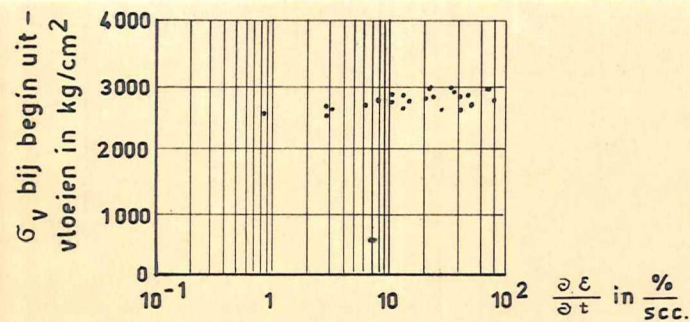
t_{vv} = tijd tussen bereiken

max. opgebrachte spanning
en begin uitvloeien

(de cijfers verwijzen naar
materiaal-tabel 1)

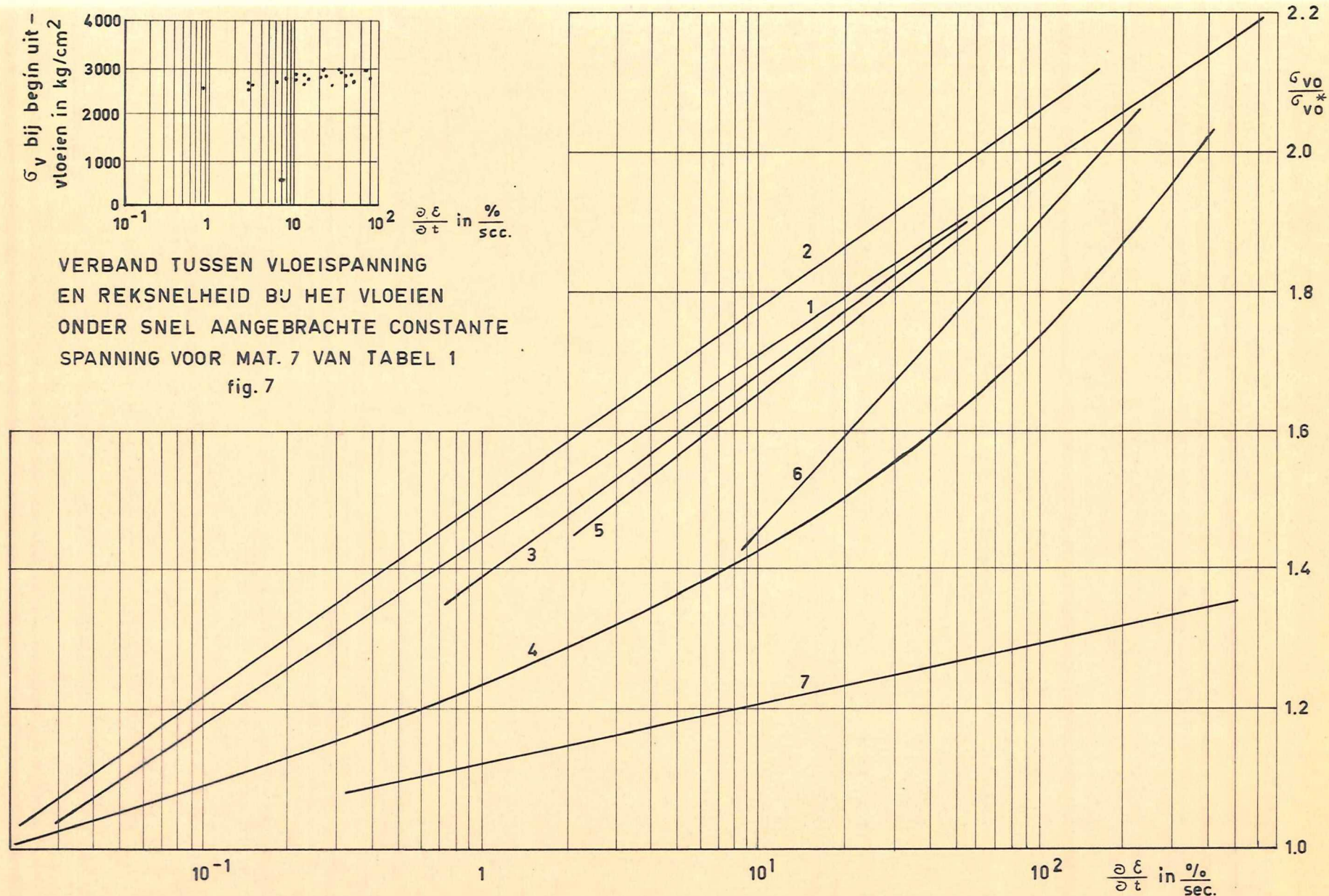
VERBAND TUSSEN SNEL OPGEBRACHTTE CONSTATE SPANNING EN DE VLOEIVERTRAGING t_{vv}

fig. 6



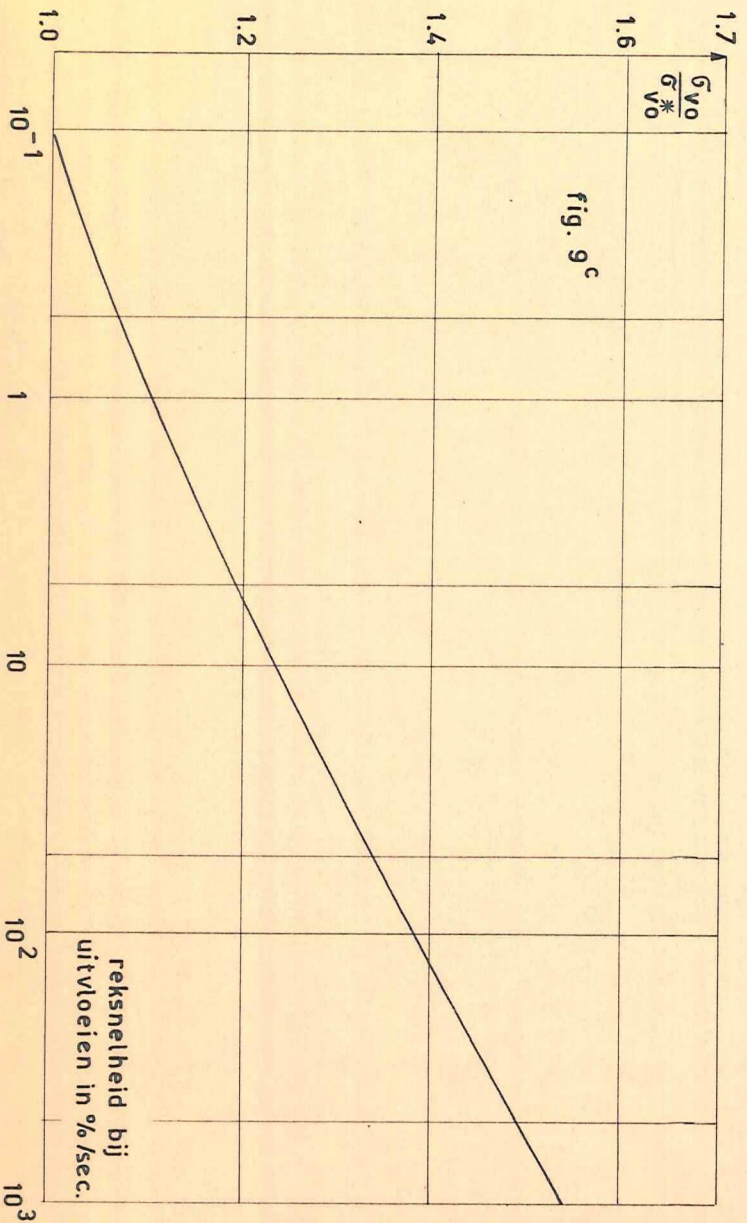
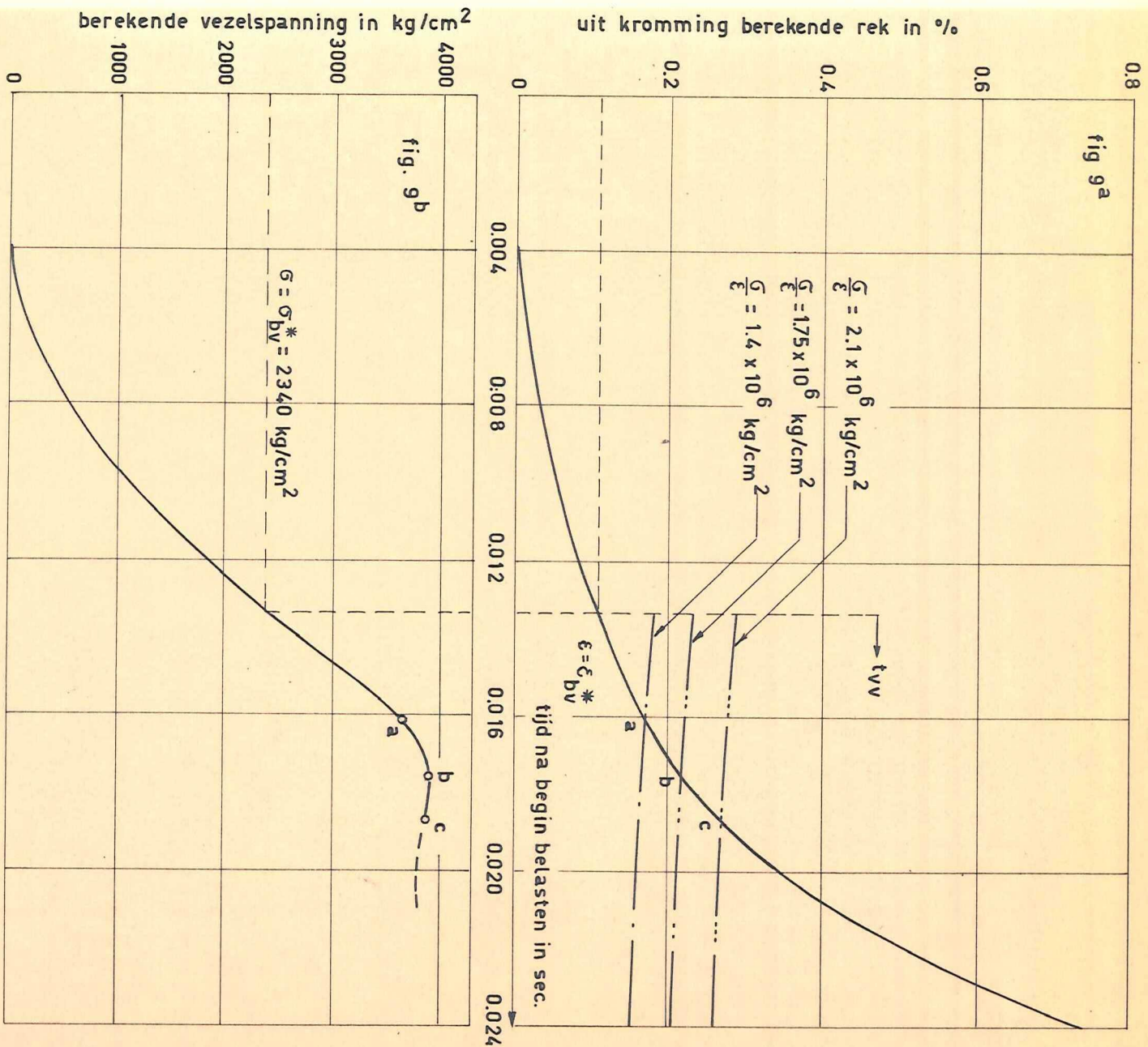
VERBAND TUSSEN VLOEISPANNING
EN REKSNELHEID BIJ HET VLOEIEN
ONDER SNEL AANGEBRACHTE CONSTATE
SPANNING VOOR MAT. 7 VAN TABEL 1

fig. 7



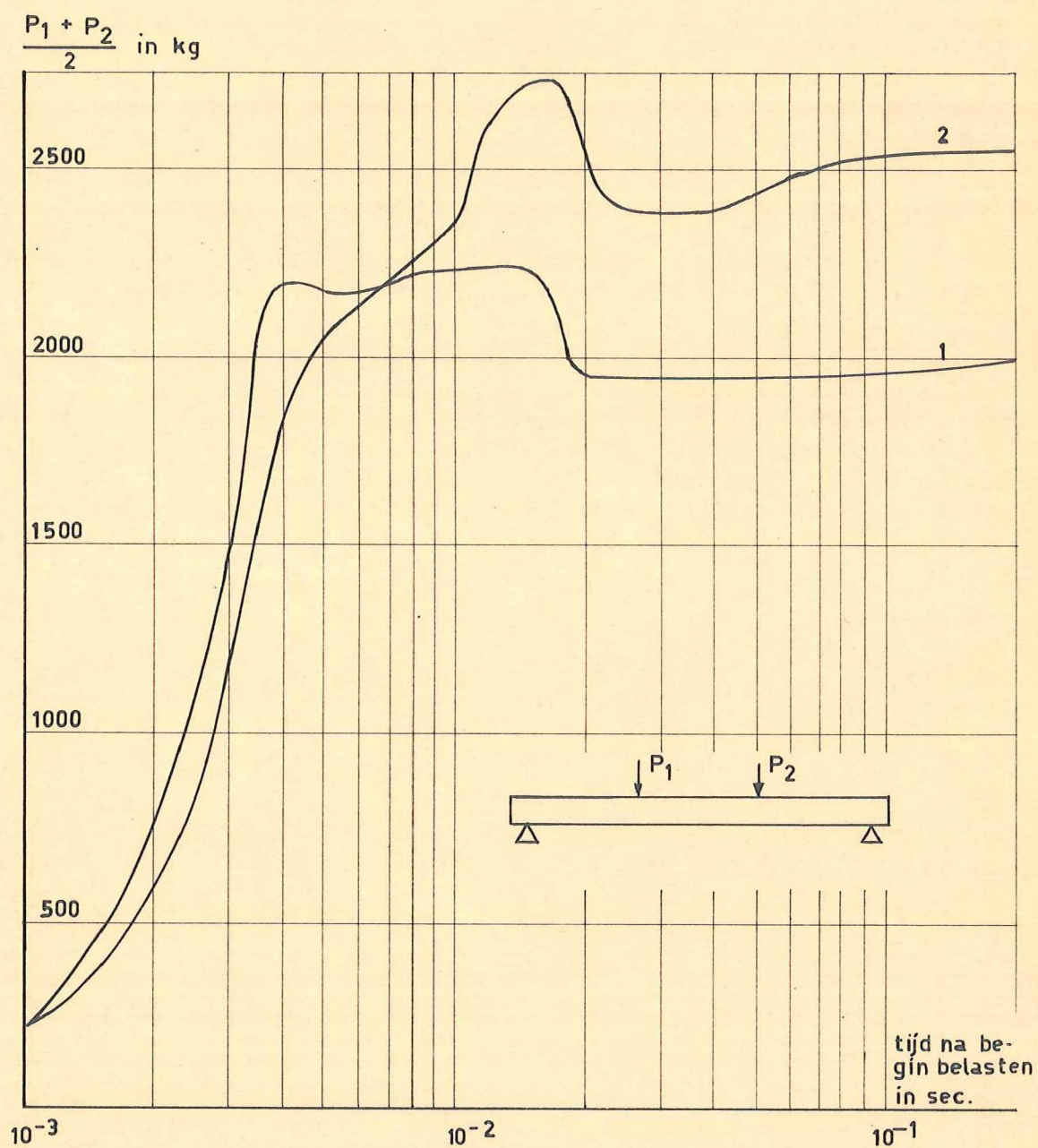
VERBAND TUSSEN DE REKSNELHEID EN DE LAAGSTE OPTREDENDE SPANNINGEN BIJ HET UITVLOEIEN
ONDER EEN IN 6 millisec. OPGEBRACHTE CONSTATE SPANNING BOVEN DE STATISCHE BOVENSTE
VLOEIGRENS (zie voor materialen tabel 1)

fig. 8



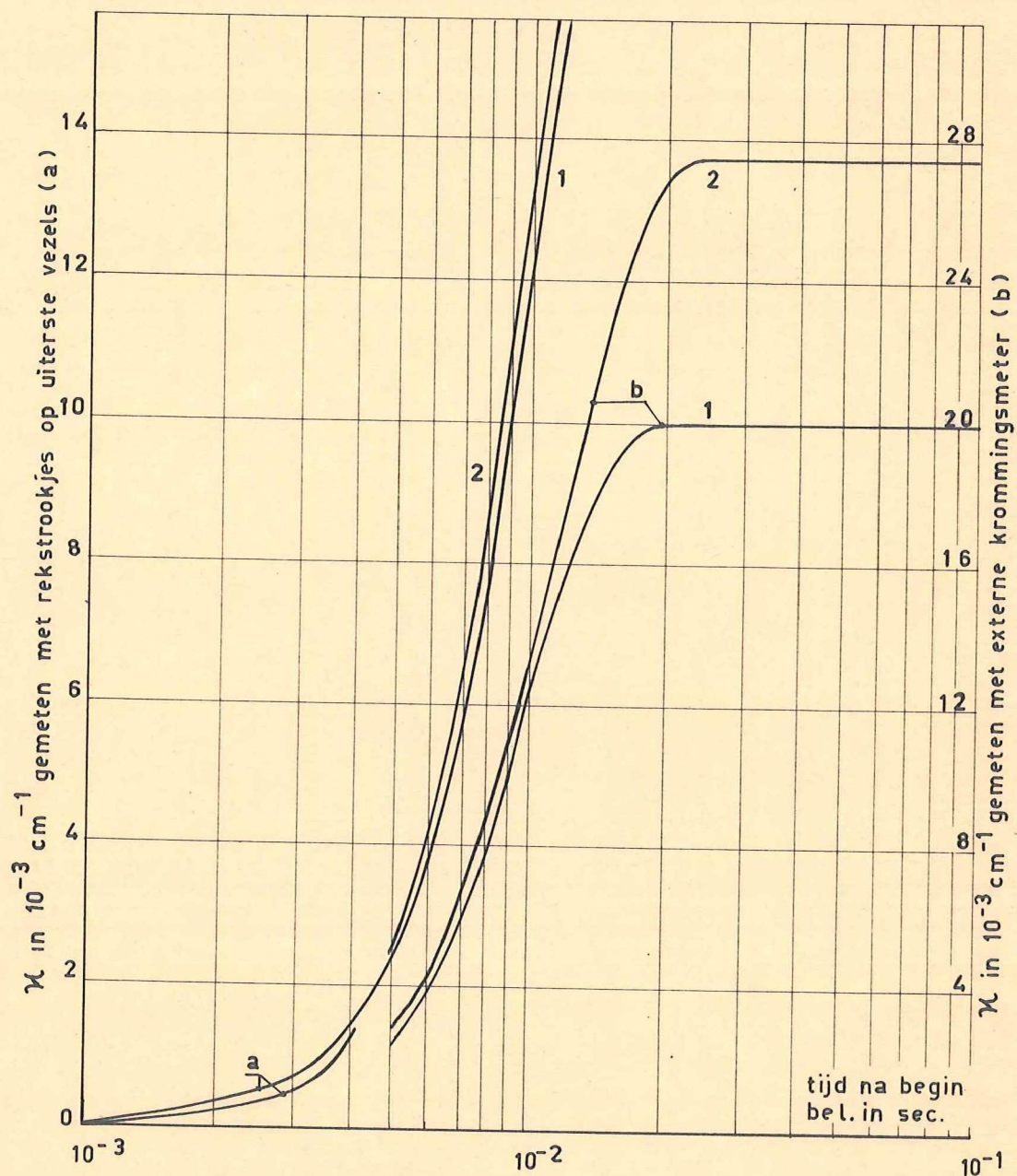
BEPALING SPANNINGSVERLOOP IN EEN VEZEL VAN EEN DYNAMISCH GEBOGEN STAAF UIT HET GEMETEN REKVERLOOP EN DE MATERIAALEIGENSCHAPPEN BEPAALD ONDER EEN SNEL OPGEBRACHTTE CONSTATE SPANNING

fig. 9

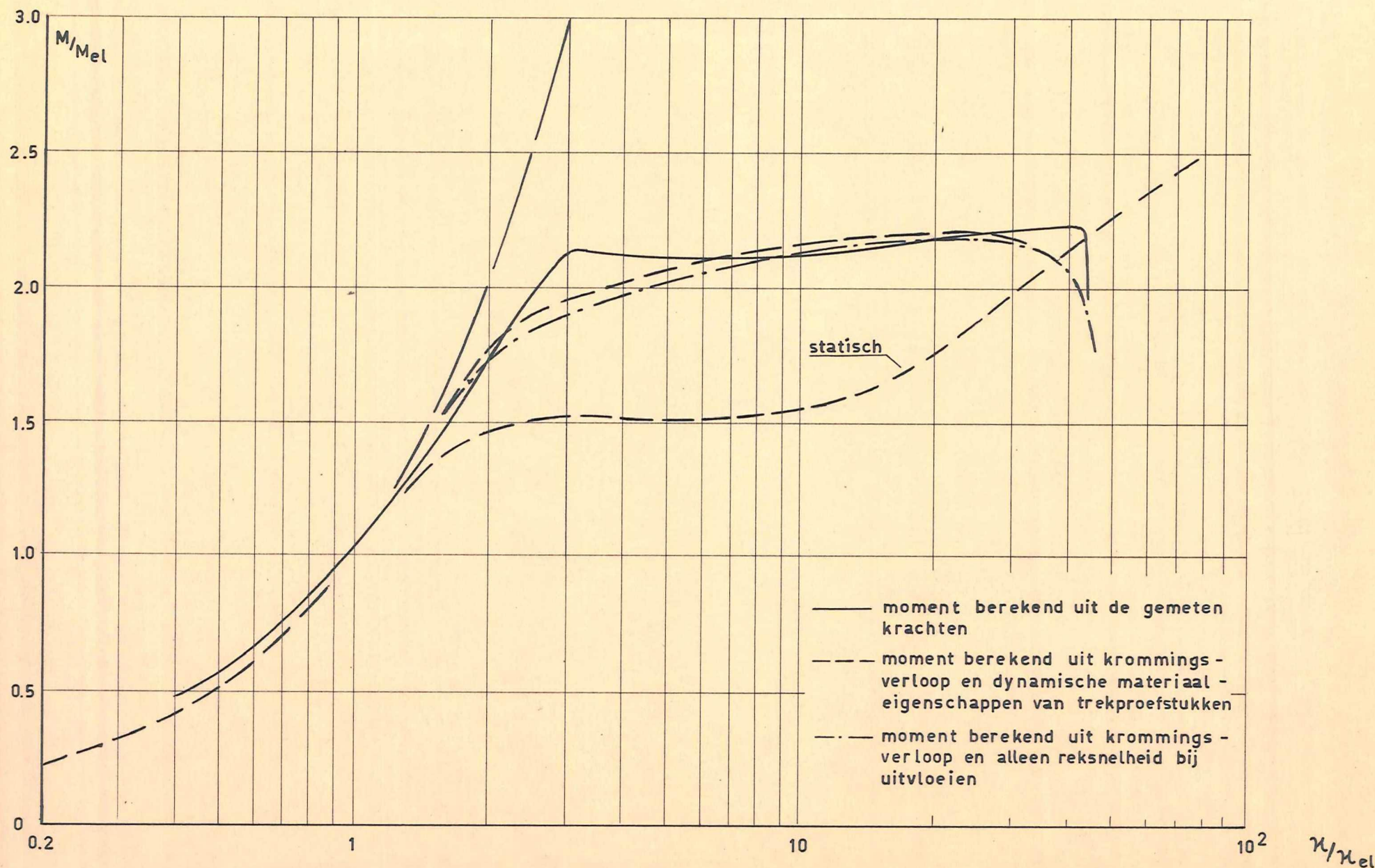


VERLOOP VAN DE GEMIDDELDE SNELLE BELASTING OP TWEE
BUIGPROEFSTAVEN

fig. 10

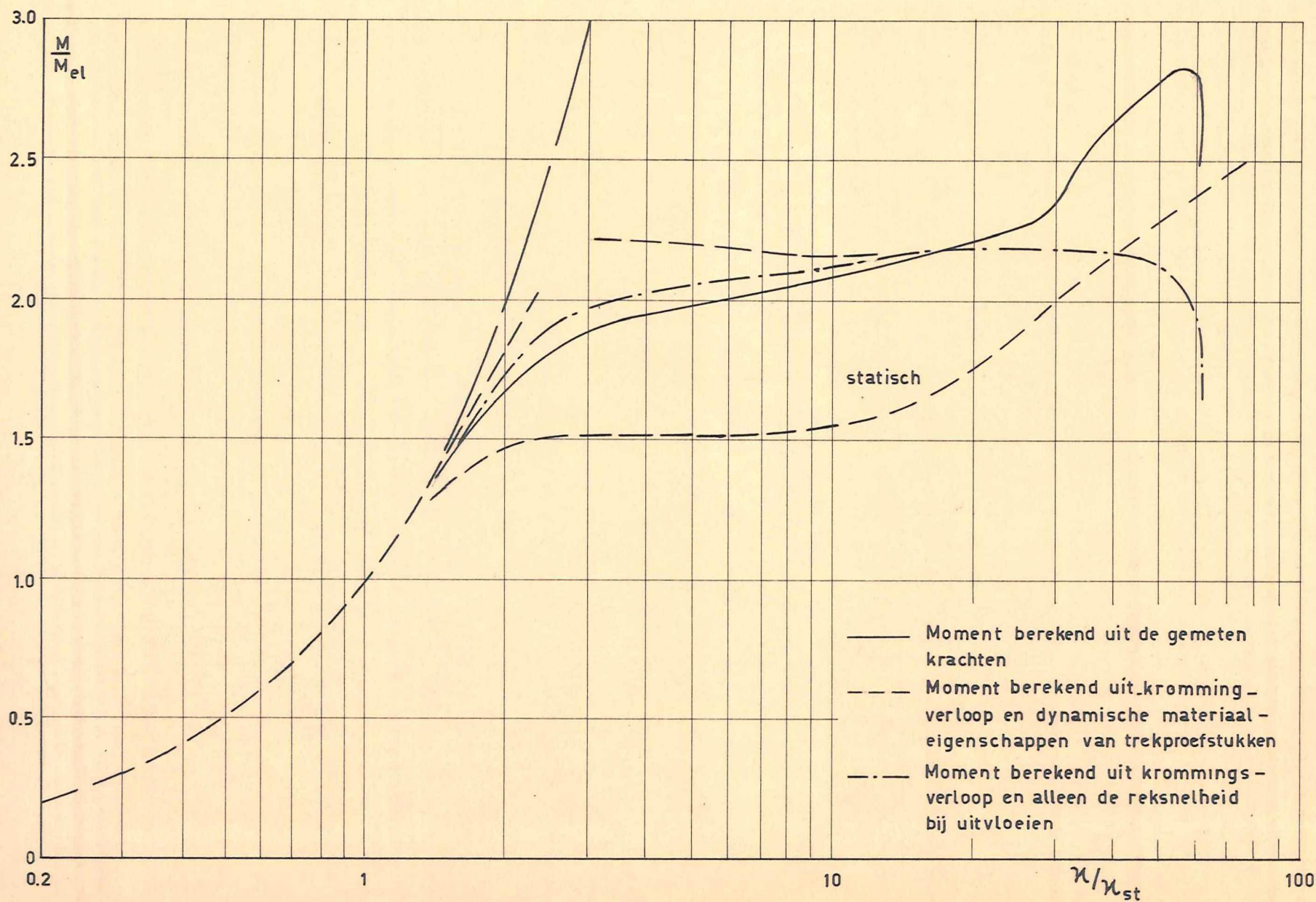


VERLOOP VAN DE KROMMING IN HET GEBIED VAN ZUIVERE
 BUIGING VOOR DE BELASTINGEN 1 EN 2 VAN fig. 10
 fig. 11



VERBAND TUSSEN WEERSTAND TEGEN BUIGING EN KROMMING VOOR BELASTING 1 VAN fig. 10

fig. 12



VERBAND TUSSEN WEERSTAND TEGEN BUIGING EN KROMMING VOOR BELASTING 2 VAN fig 10

fig. 13

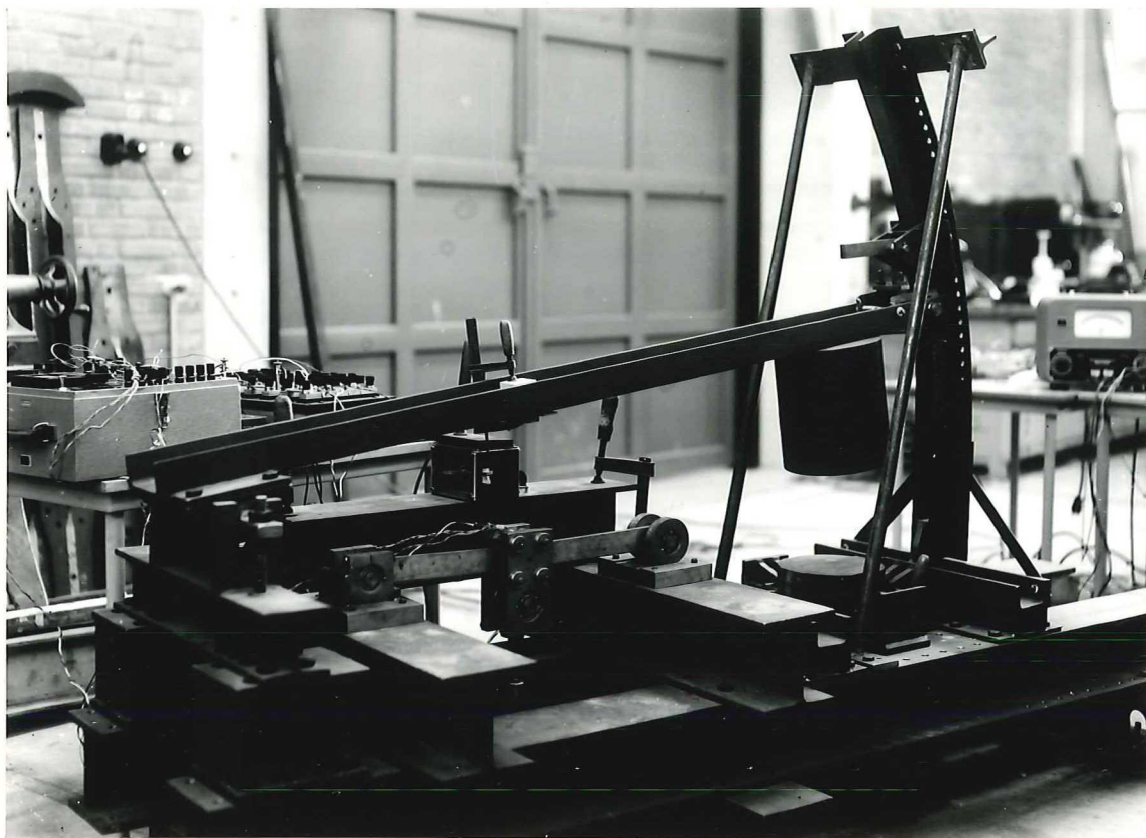


fig. 14. Overzicht van de opstelling in zijn geheel.

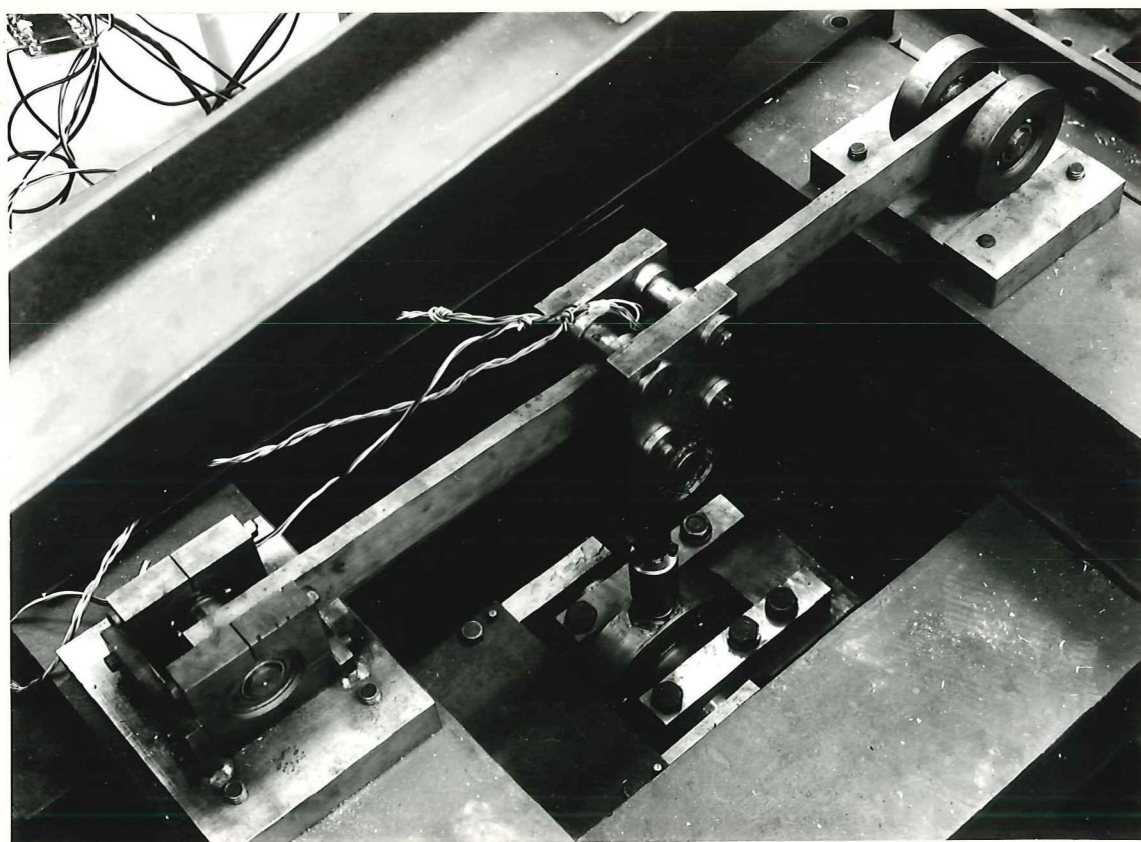


fig. 16. Proefstaaf met opleggingen, belastingsblok en dynamometer.

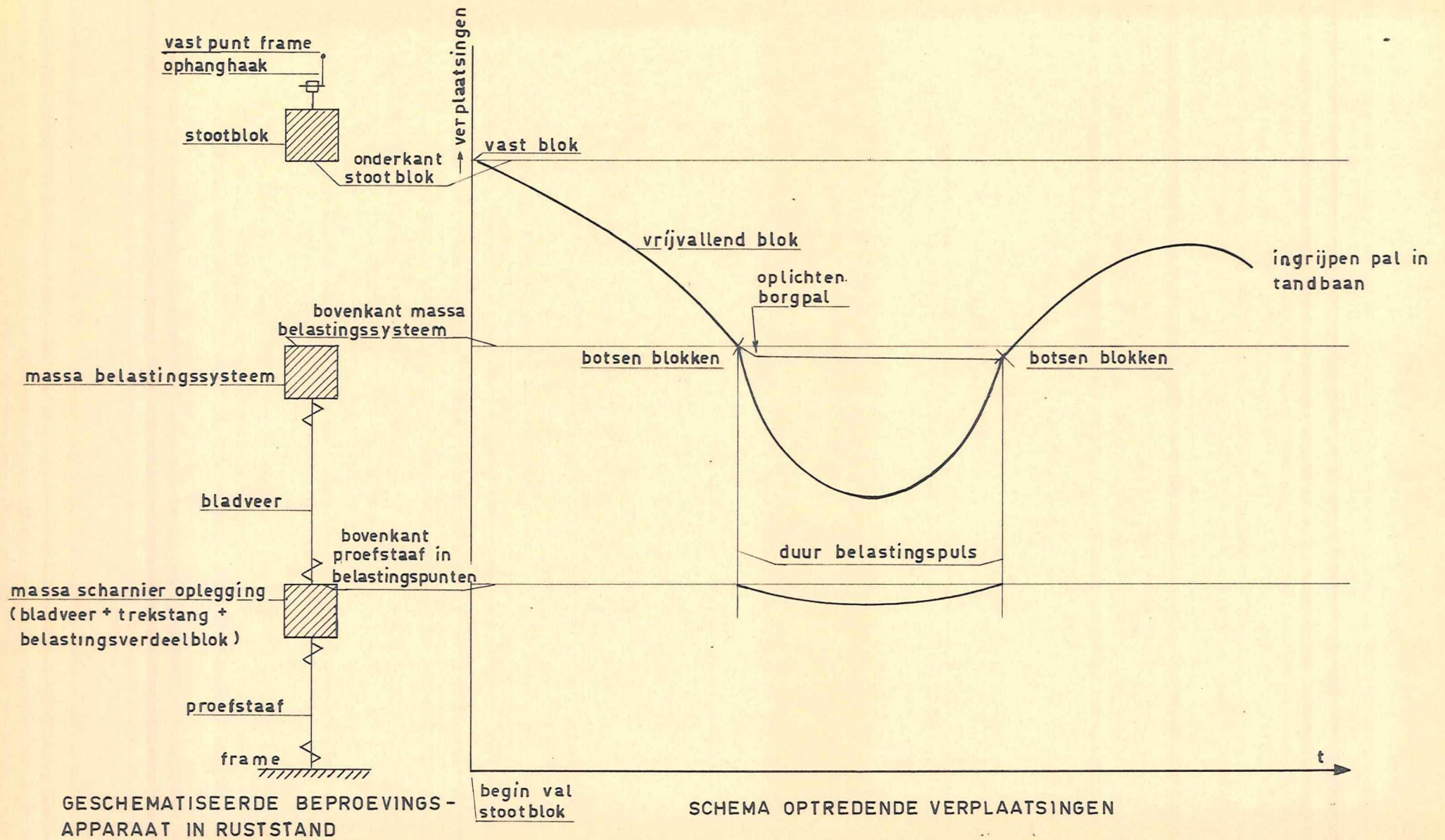
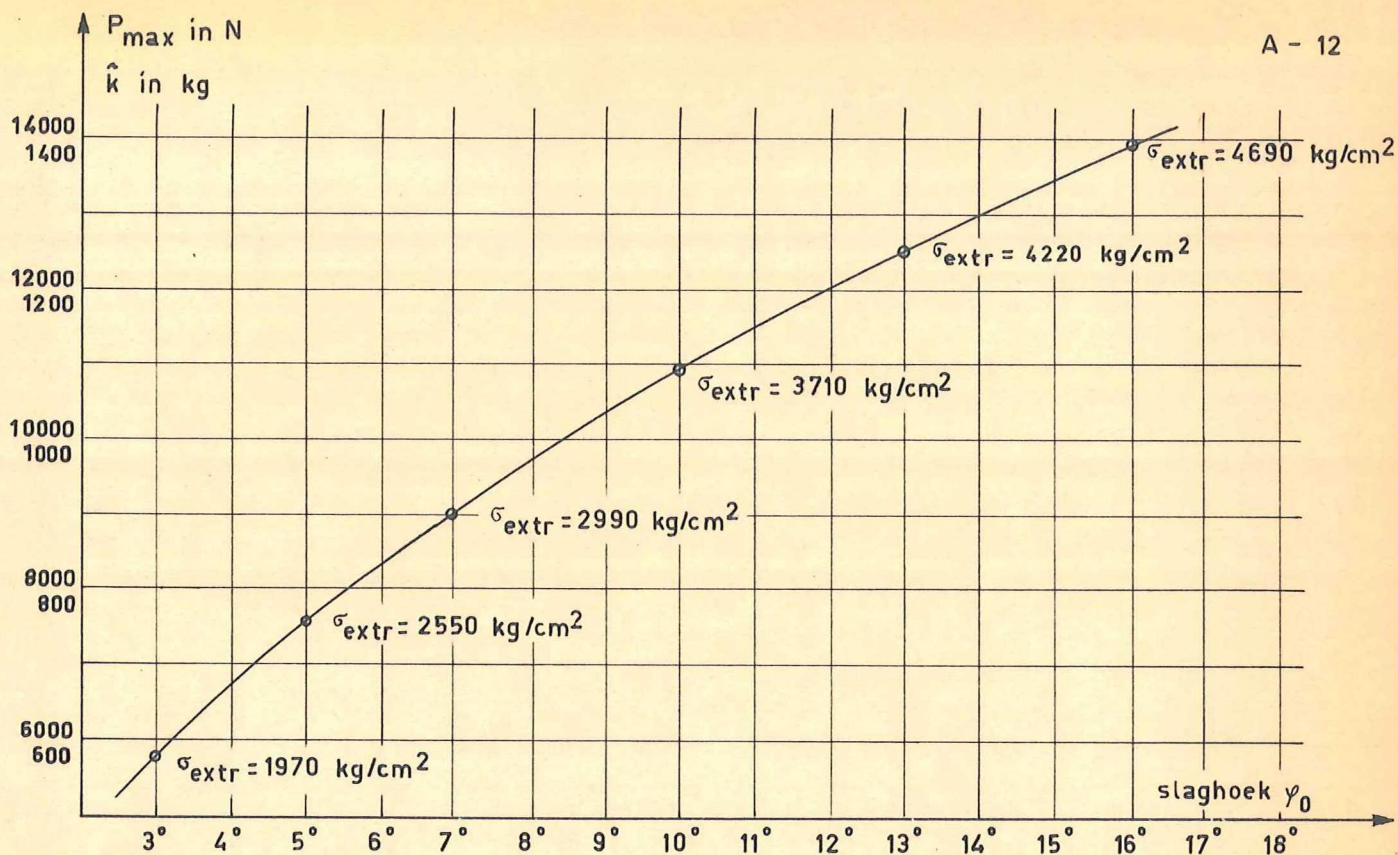
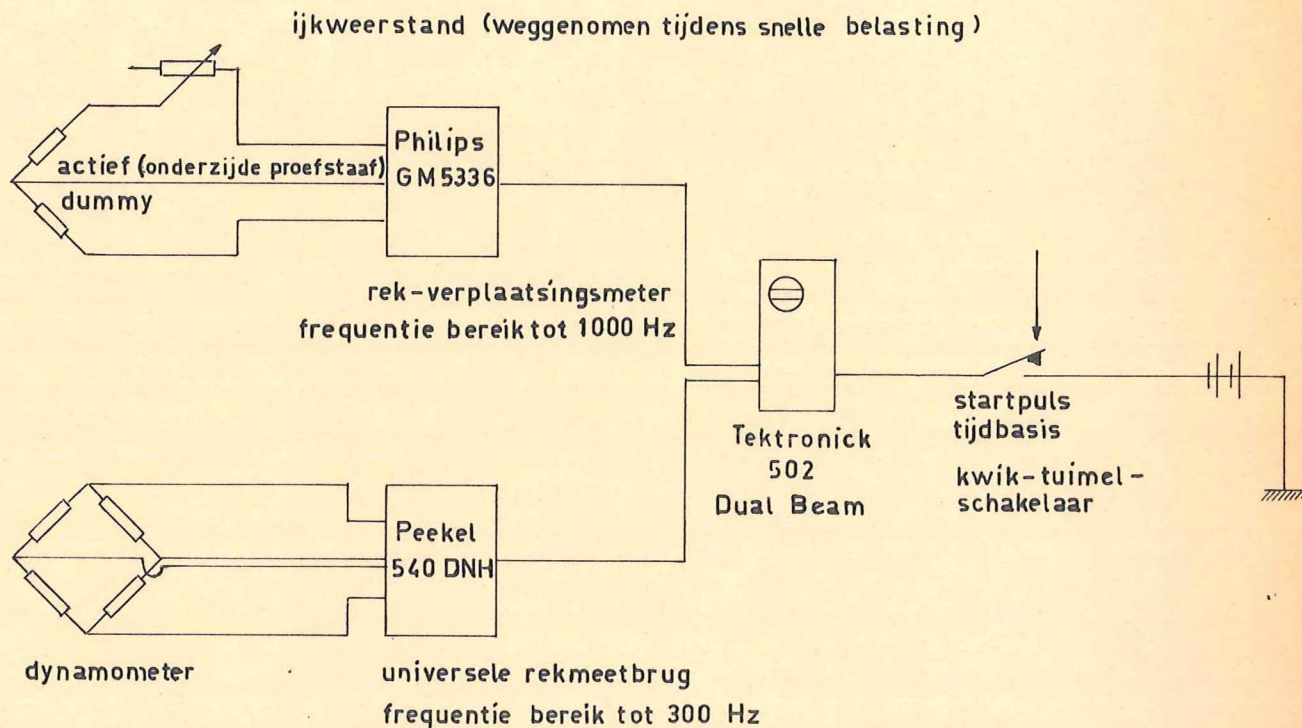


fig.17 SCHEMATISCH OVERZICHT BEPROEVINGSAPPARAAT EN ZIJN WERKING



THEORETISCH VERBAND TUSSEN SLAGHOEK EN MAX. VAN DE BELASTINGSPULS. BIJGESCHREVEN ZIJN DE OPGEWEEKTE „ELASTISCHE” SPANNINGEN IN DE MEETZONE VAN DE PROEFSTAAF.

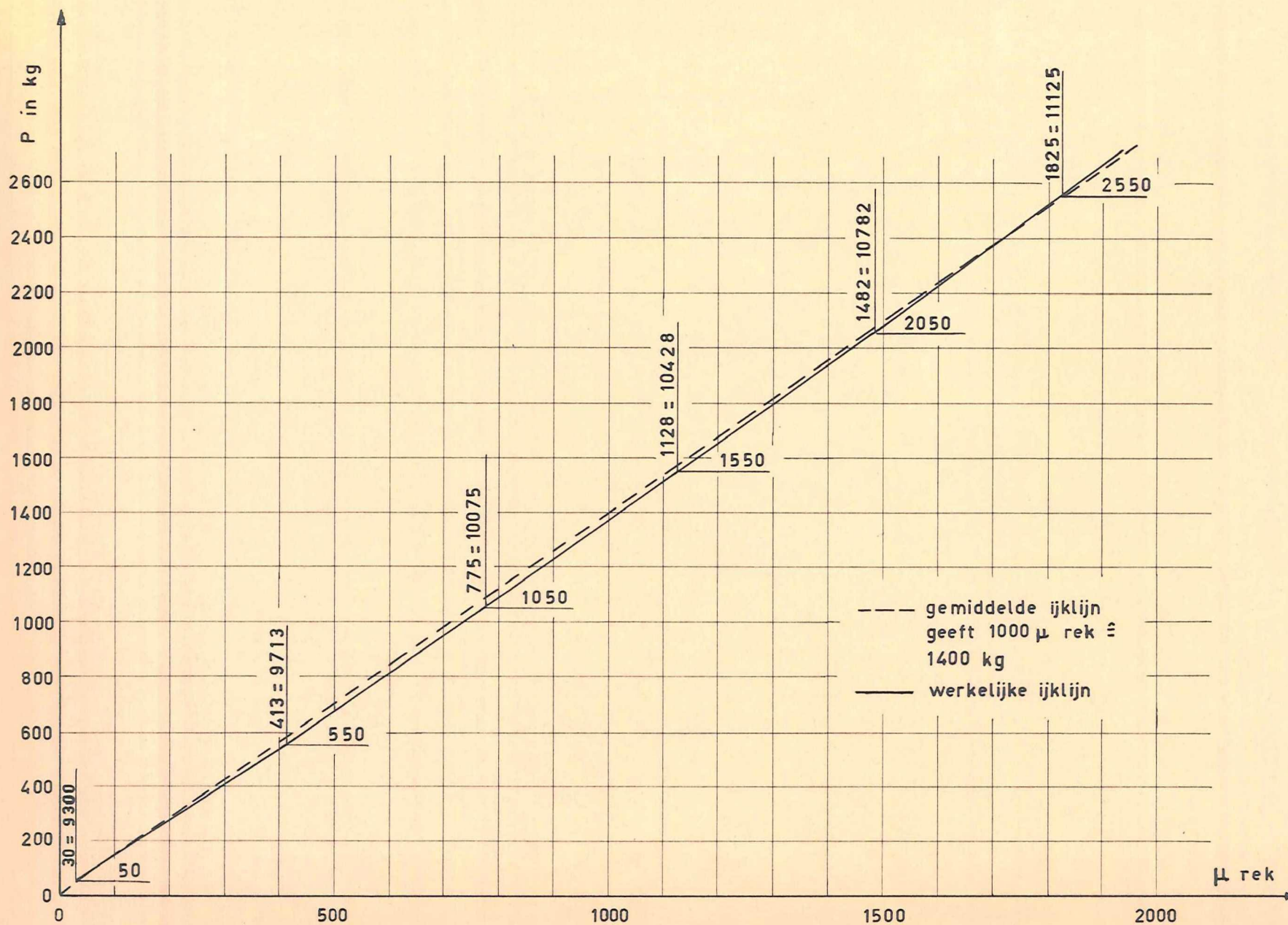
fig. 18



De rimpeling in de nullijnen en in de ijklijnen wordt veroorzaakt door onvoldoende affiltering van de draaggolven (zie fig. 29 en 30)

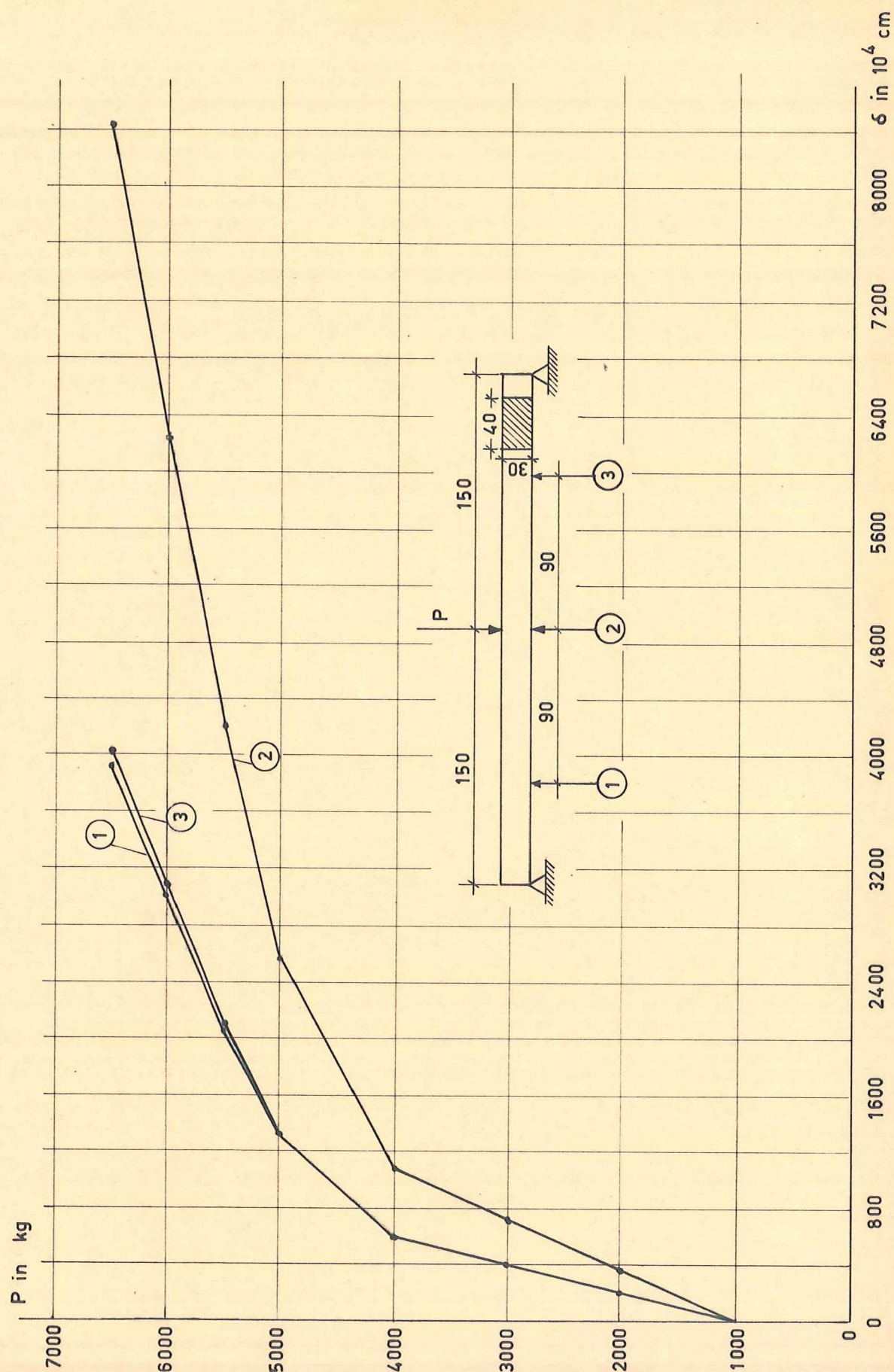
BLOKSCHEMA VAN DE MEETAPPERATUUR VOOR DE DYNAMISCHE BUIGPROEVEN

fig. 19



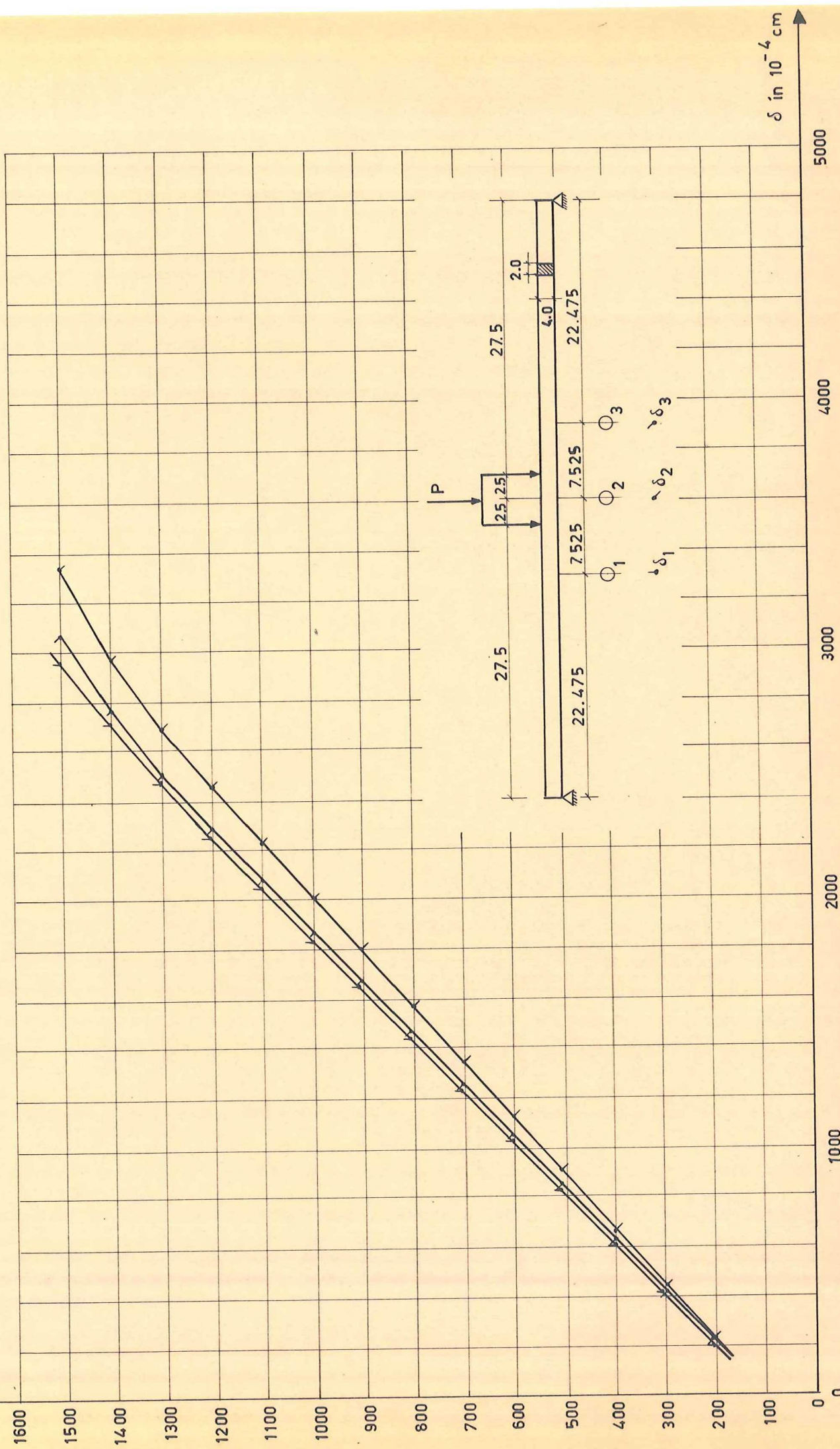
UKDIAGRAM DYNAMOMETER

fig. 20



P - δ DIAGRAMMEN VOOR STATISCHE BUIGPROEF (mat. bladveer)

fig. 21



BELASTINGS-EN MEETSCHAMA VAN STATISCHE BUIGPROEVEN EN LAST-ZAKKINGSDIAGRAMMEN VOOR STAAF N° 1

fig. 22

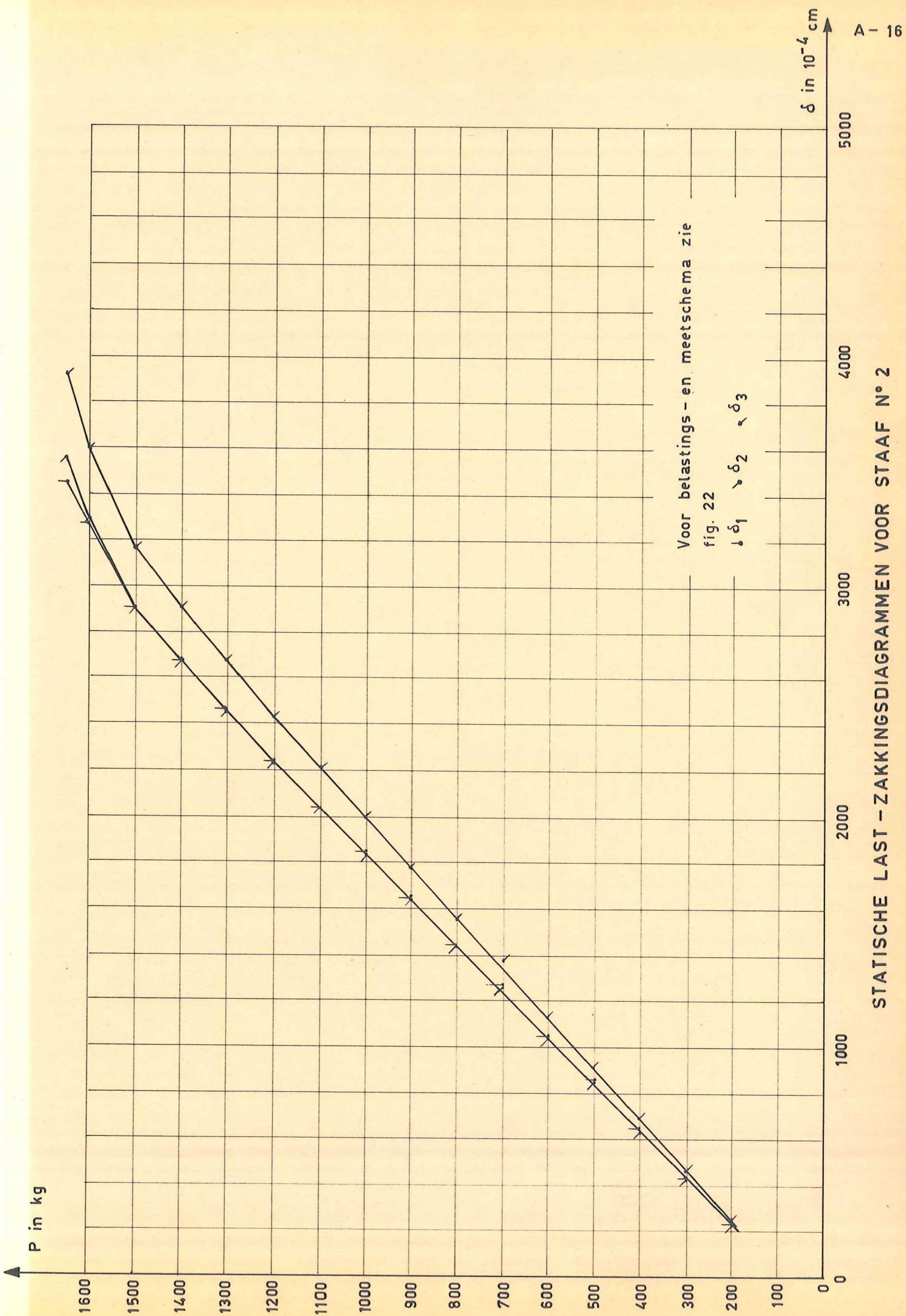
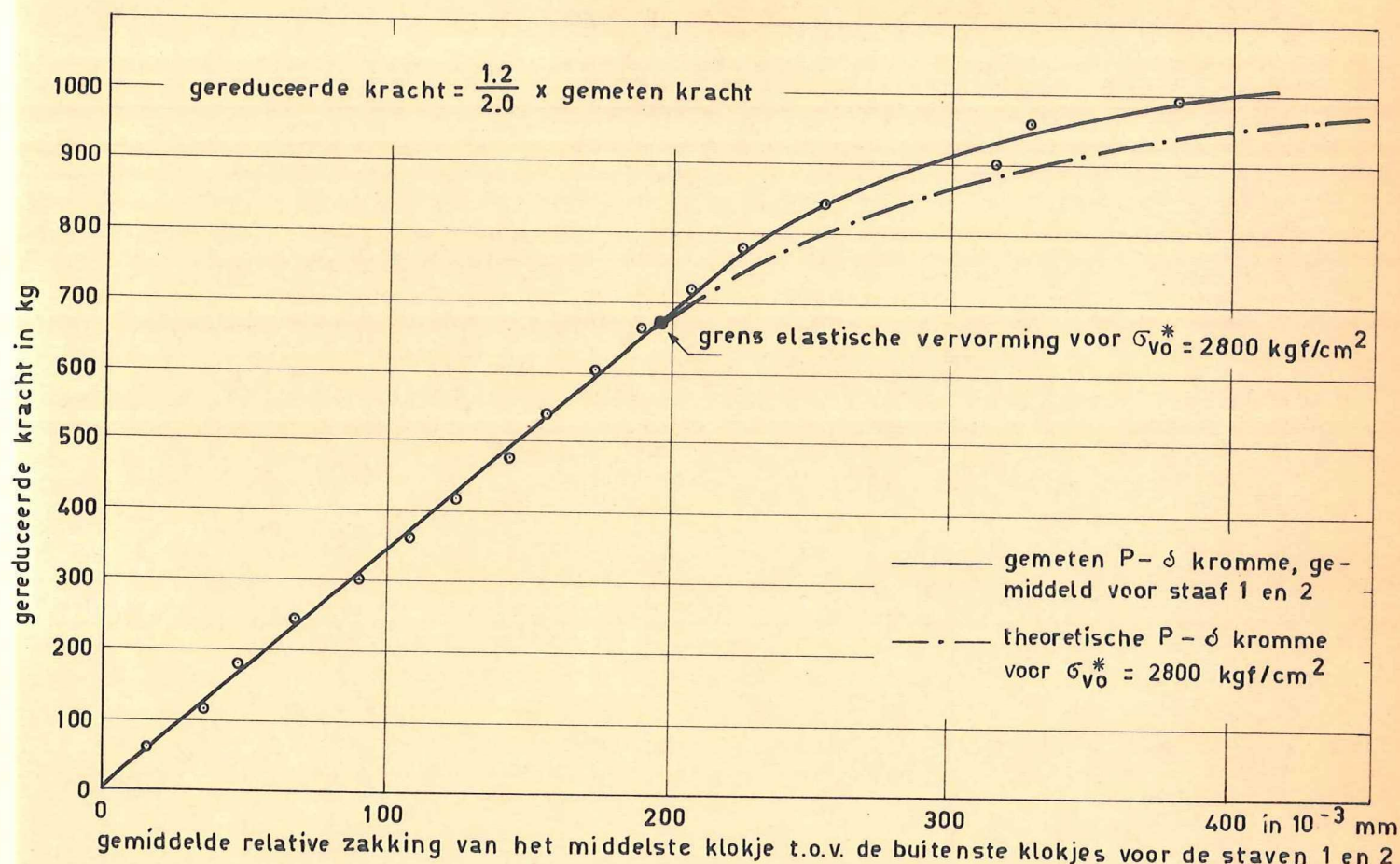
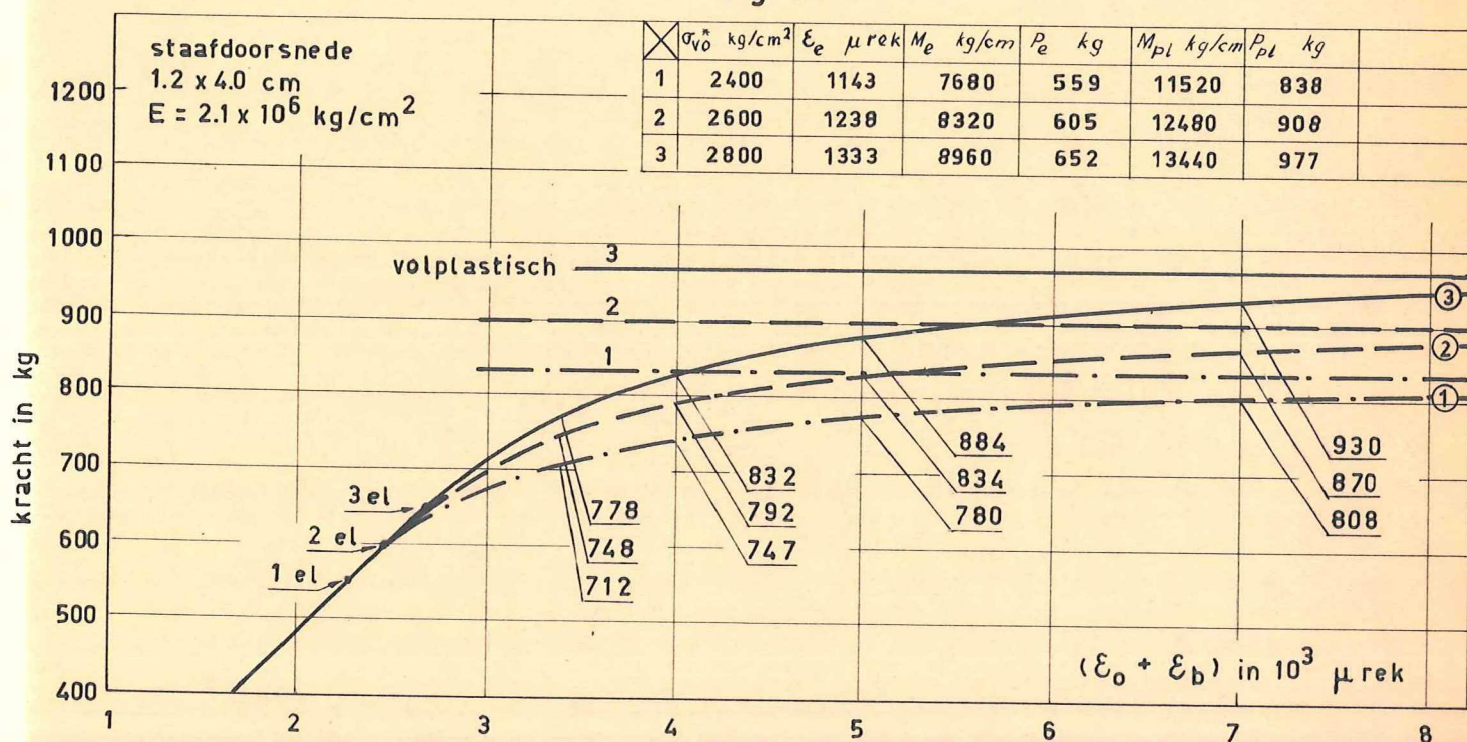


fig. 23



GEMIDDELTE RELATIVE ZAKKING BIJ DE VOOR DE DYNAMISCHE PROEFSTAAFVORM GEREDUCEERDE BELASTING VOOR DE STAVEN N° 1 EN N° 2

fig. 24^a



VERBAND TUSSEN STATISCHE BELASTING EN DE KROMMING VAN DE ZUIVER GEBOGEN ZÔNE UITGEDRUKT IN DE REK VAN DE UITERSTE VEZELS VOOR VERSCHILLENDE WAARDEN VAN DE STATISCHE ONDERSTE VLOEIGRENS

fig. 24^b

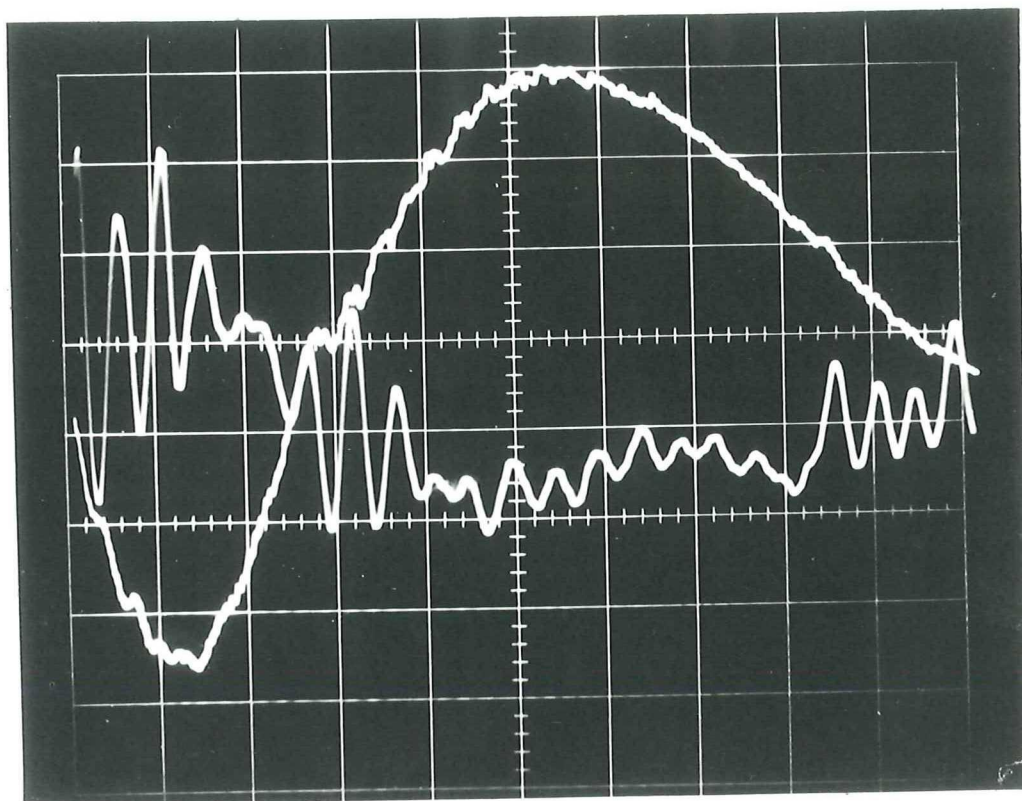


fig. 25 Krachtverloop en afgelegde weg van de geconcentreerde massa van het belastingssysteem (vloeiende kromme.)
 Tijdbasis: 1 deelstreep $\hat{=}$ 10 milliseec.
 Weg: 1 deelstreep $\hat{=}$ 5 mm.

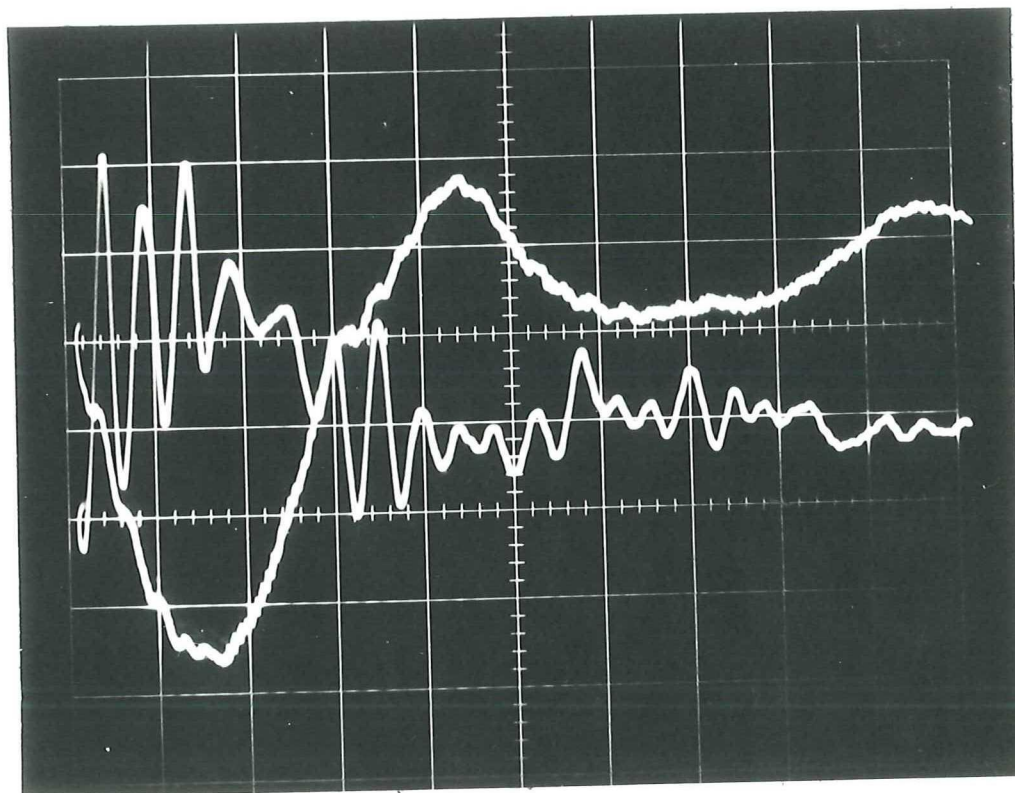


fig. 26 Als fig. 25, waarbij nu het doorslaan van het belastingssysteem door houten stoppen is tegengegaan

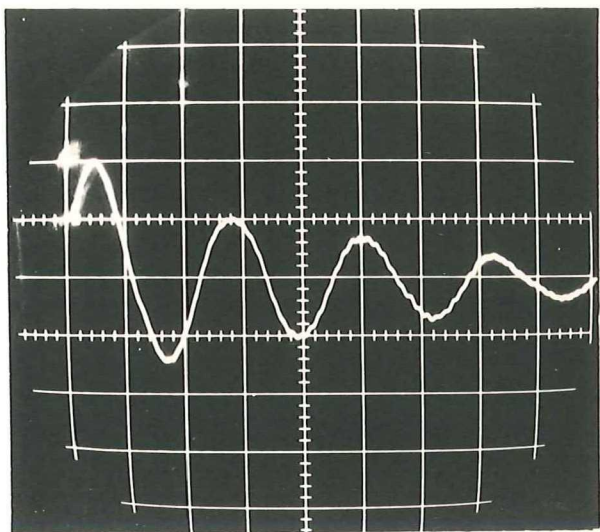


fig. 27 Meting eigen frequentie
proefstaaf (tijdbasis: 1 deelstreep $\hat{=}$
5 milliseec.)

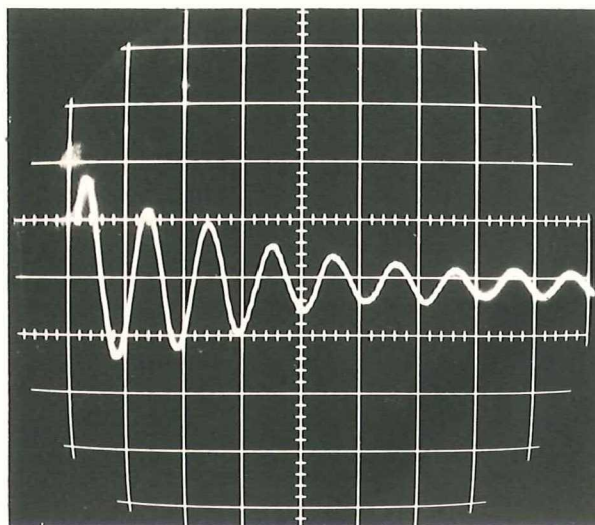


fig. 28 Meting van de eigen frequ-
entie van de proefstaaf met belas-
tingsblok samen (tijdbasis: 1 deel-
streep $\hat{=}$ 10 milliseec.)

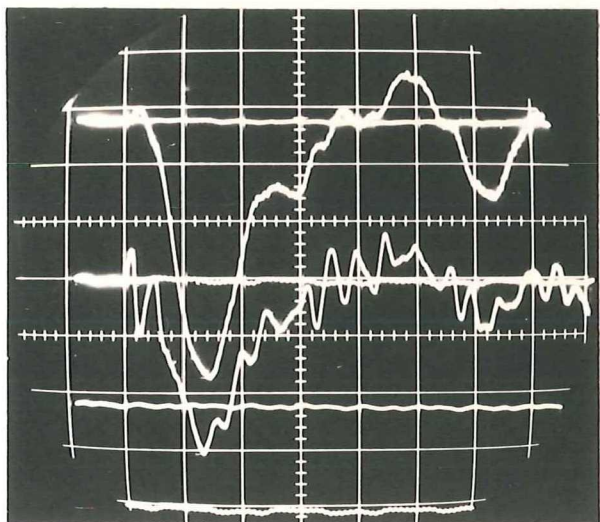


fig. 29 Registratie van een belastings-
puls op staaf n° 6, waarbij kleine
plastische vervormingen zijn op-
gewekt.

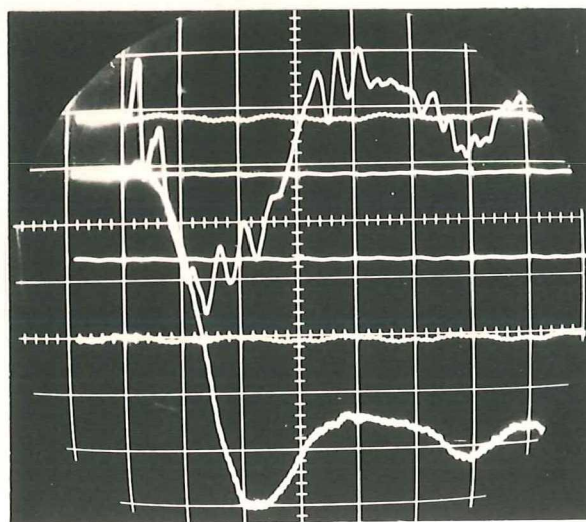
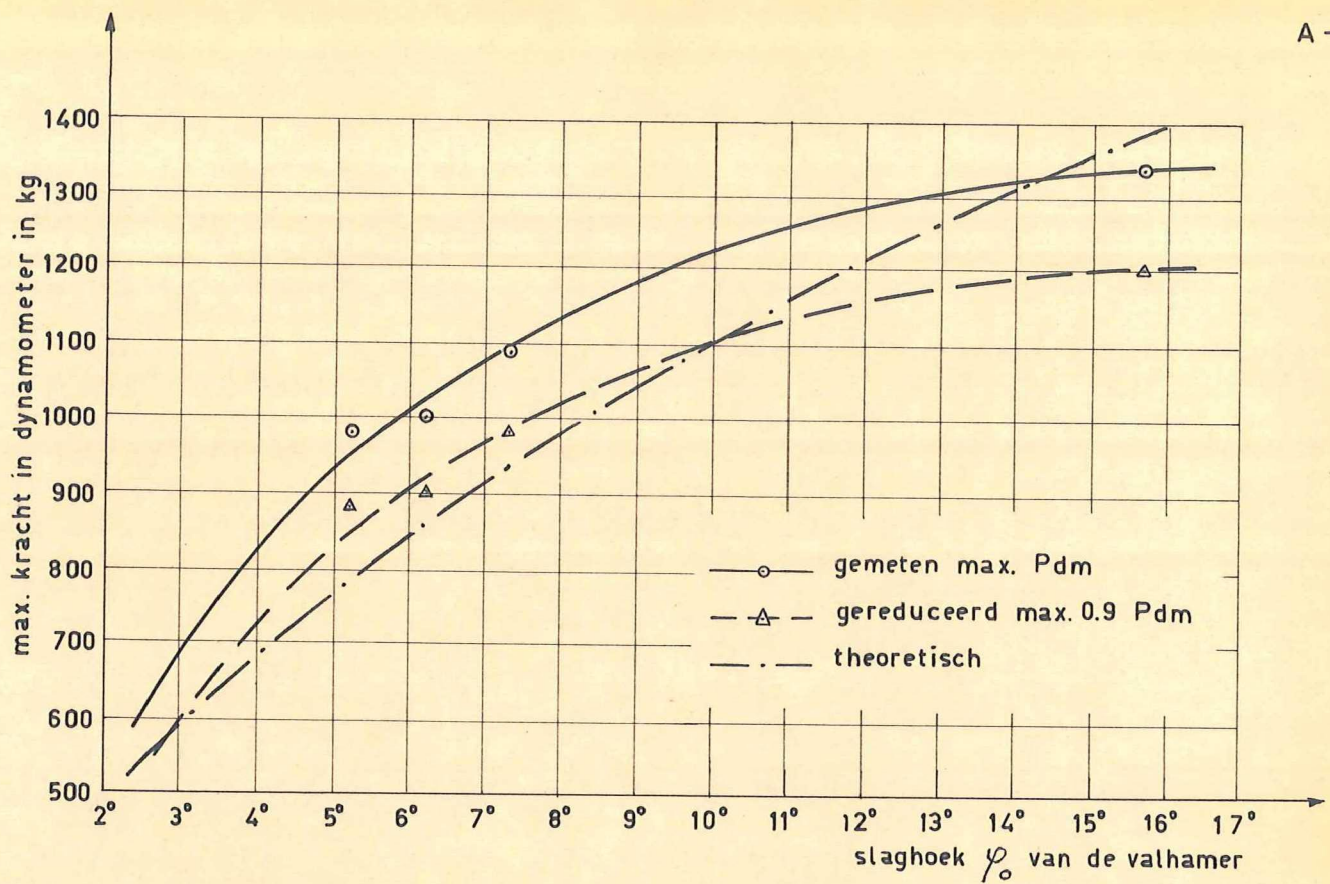
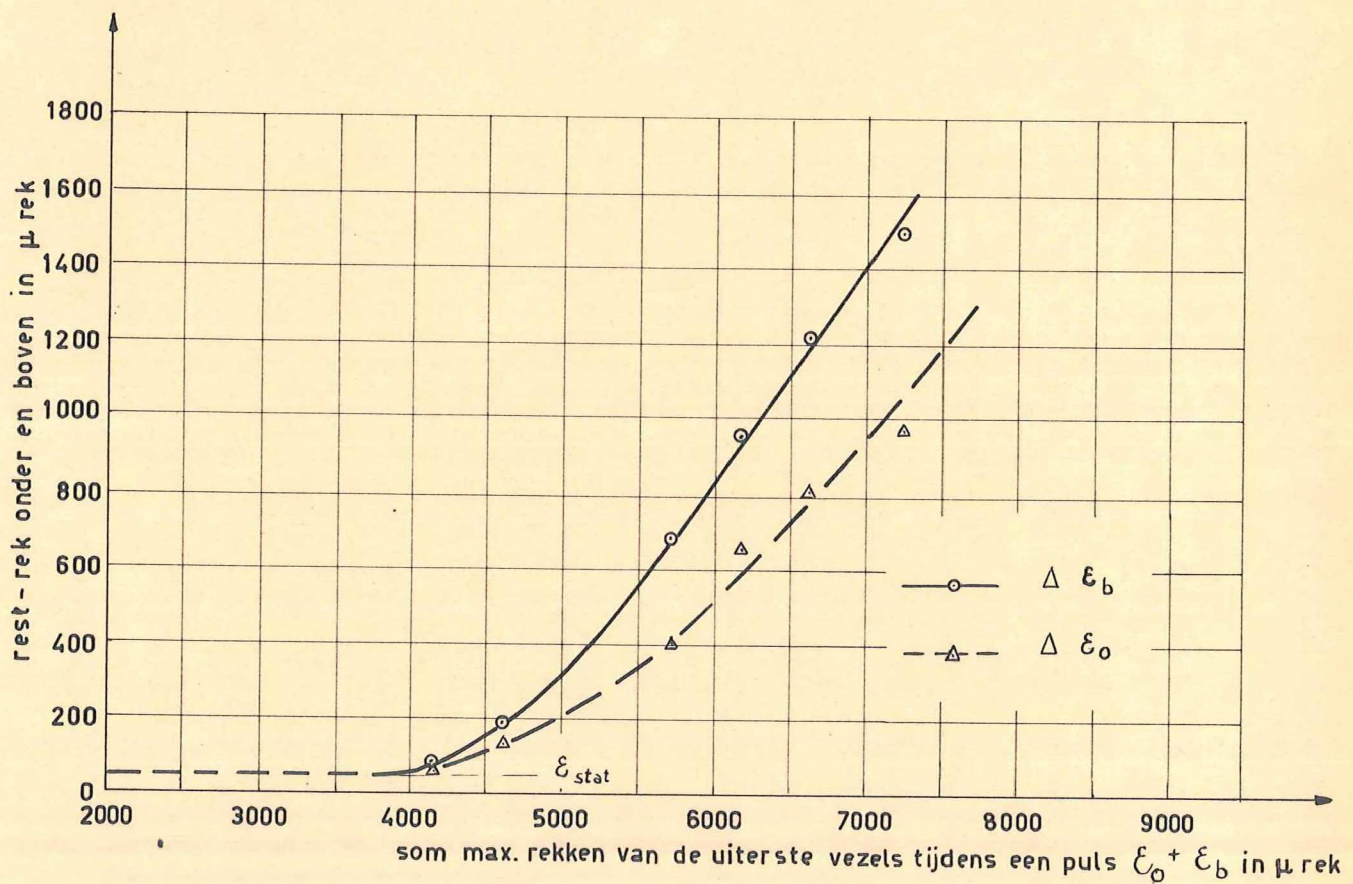


fig. 30 Registratie van de belastings-
puls op staaf n° 8, waarbij grote
plastische vervormingen zijn op-
gewekt.



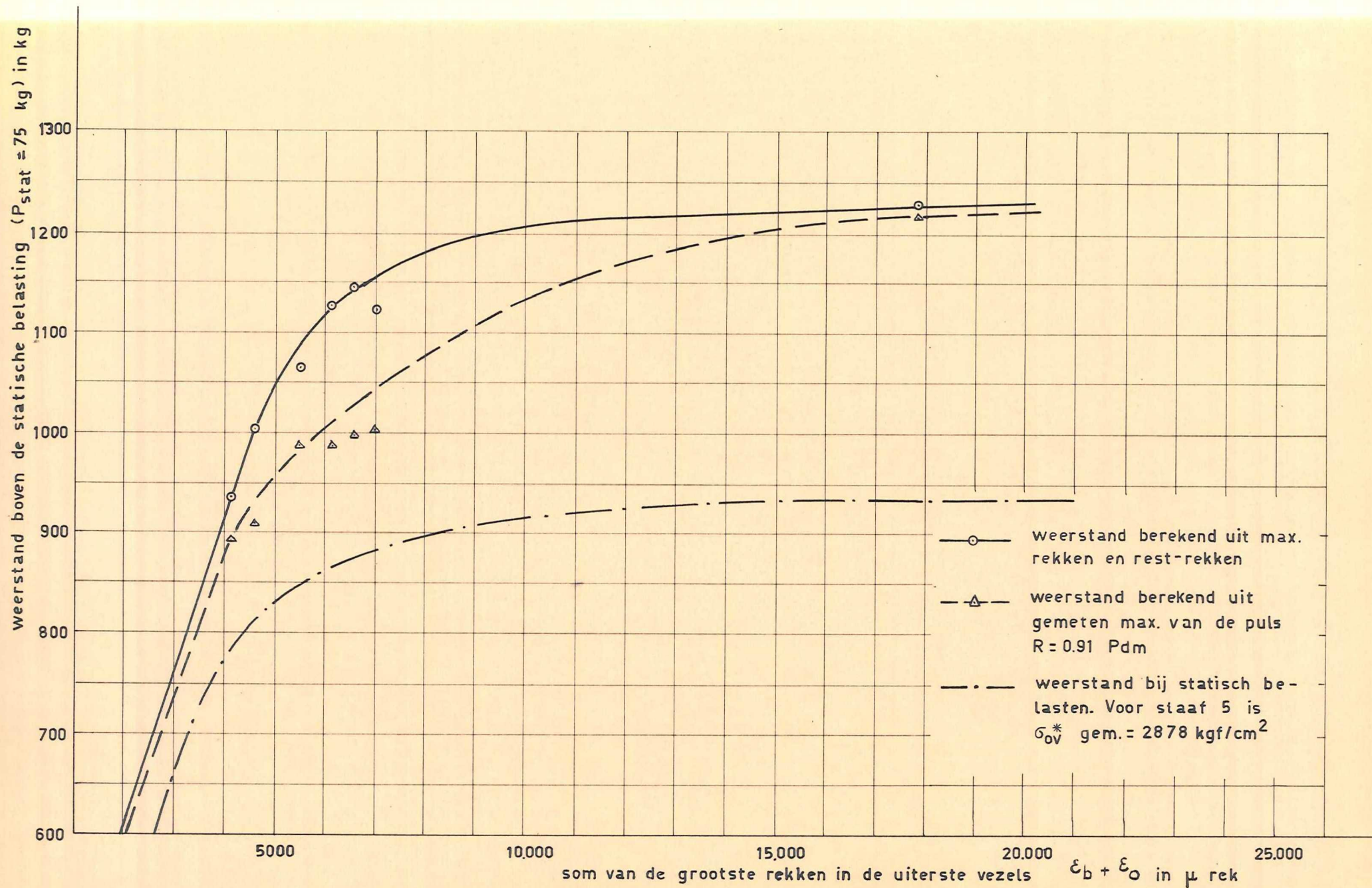
VERBAND TUSSEN SLAGHOEK VALHAMER EN MAX. OPGEWEKTE PULS
 VOOR STAAF N° 5

fig. 31^a



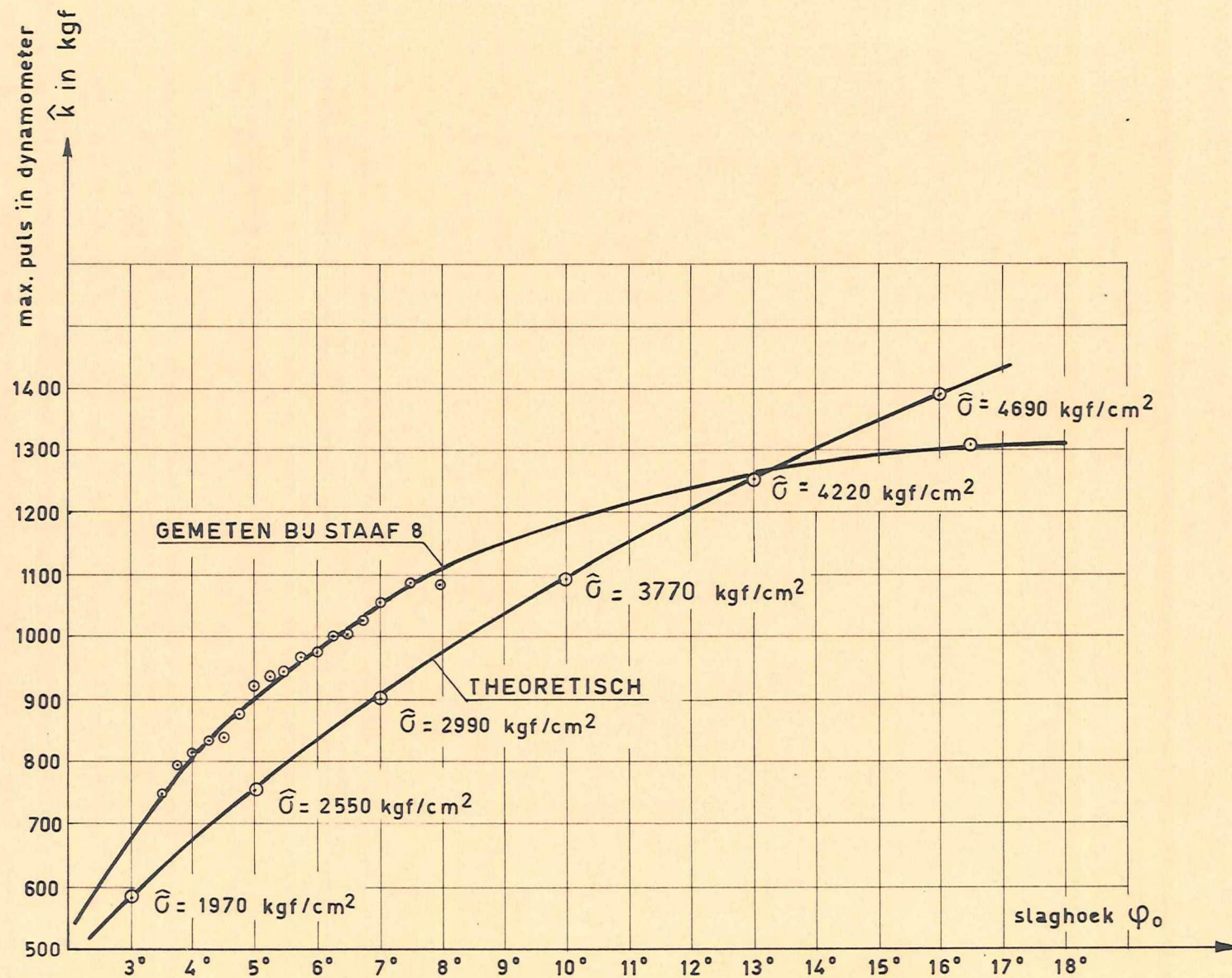
VERBAND TUSSEN REST-REK EN MAX. REK BIJ DE OPVOLGENDE
 DYNAMISCHE BELASTINGEN GEMETEN T.O.V. DE ONBELASTE
 TOESTAND VOOR STAAF N° 5

fig. 31^b



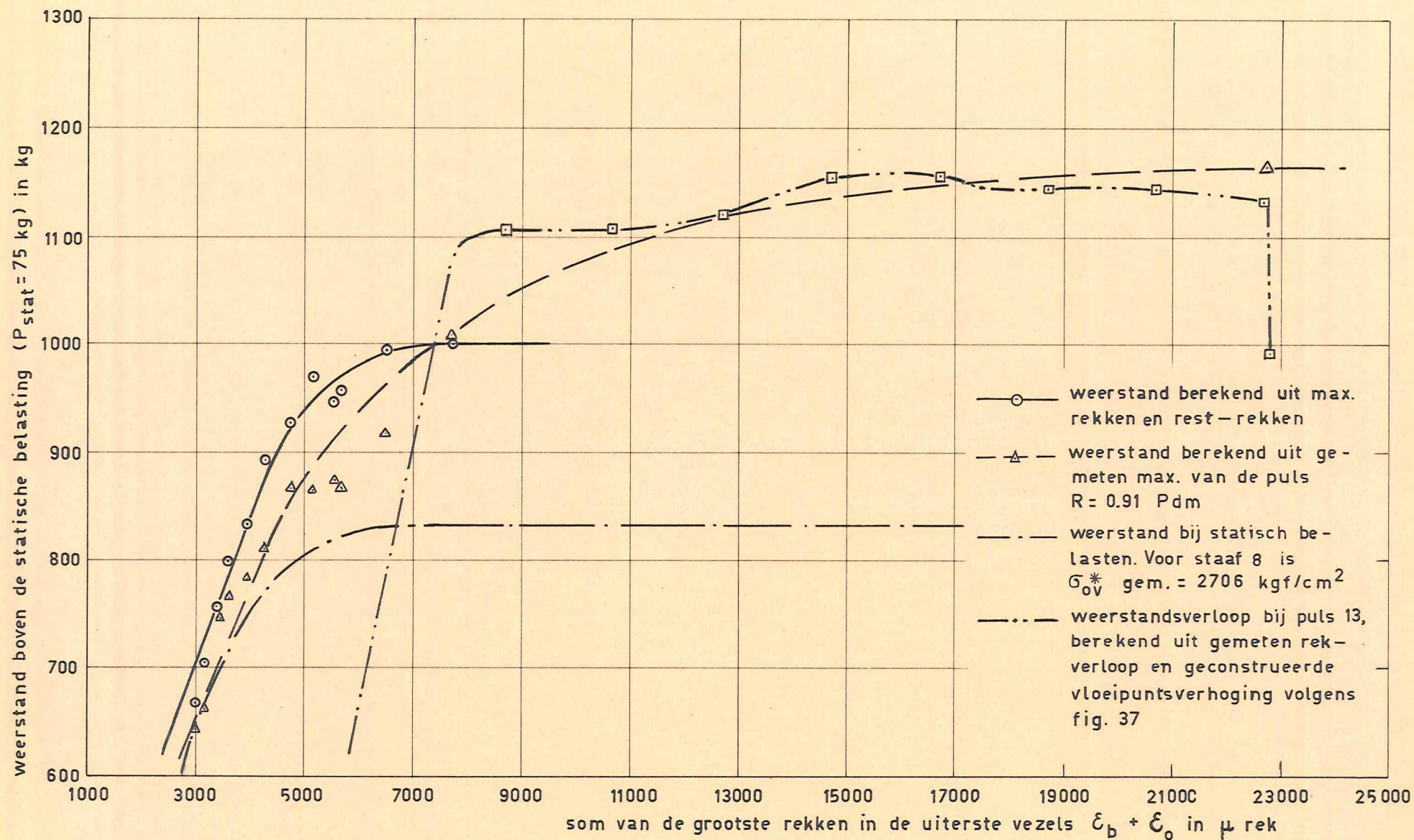
VERBAND TUSSEN STAAFWEERSTAND EN DE SOM VAN DE GROOTSTE REKKEN IN DE UITERSTE VEZELS
MEETDOORSNEDE VOOR STAAF N° 5

fig. 31^c



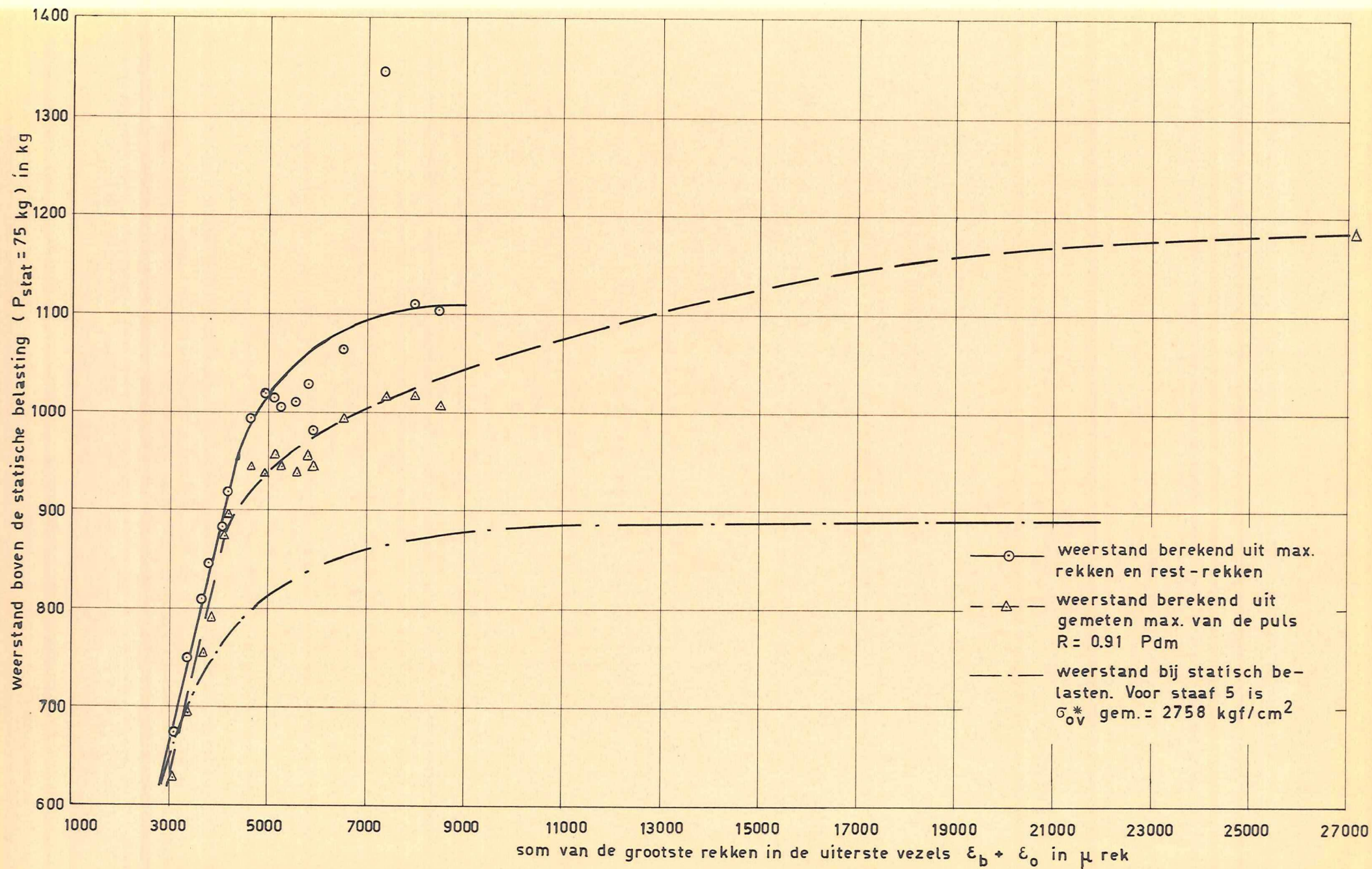
VERBAND TUSSEN SLAGHOEK EN MAX. BELASTINGSPULS

fig. 32^a



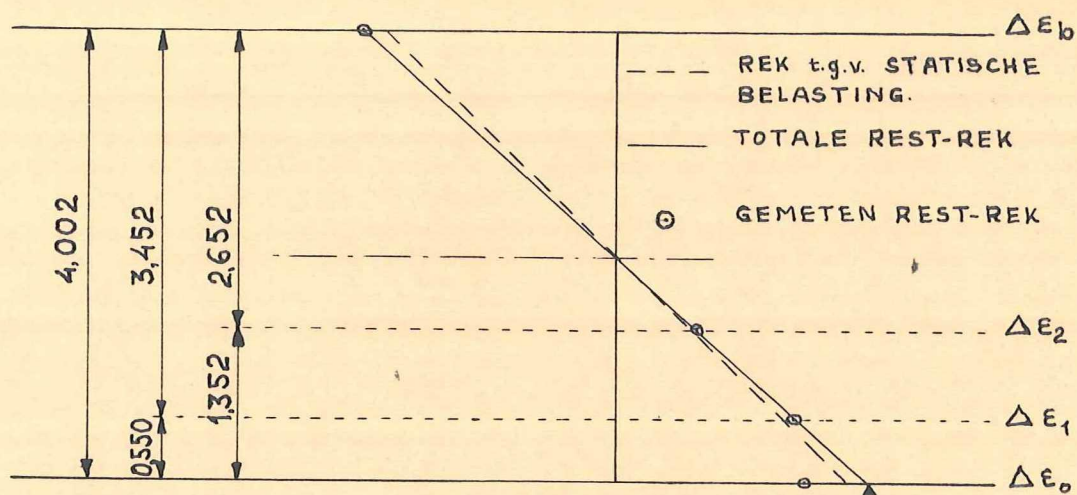
VERBAND TUSSEN STAAFWEERSTAND EN DE SOM VAN DE GROOTSTE REKKEN IN DE UITERSTE VEZELS VAN DE MEETDOORSNEDE VAN STAAF N° 8

fig. 32^b

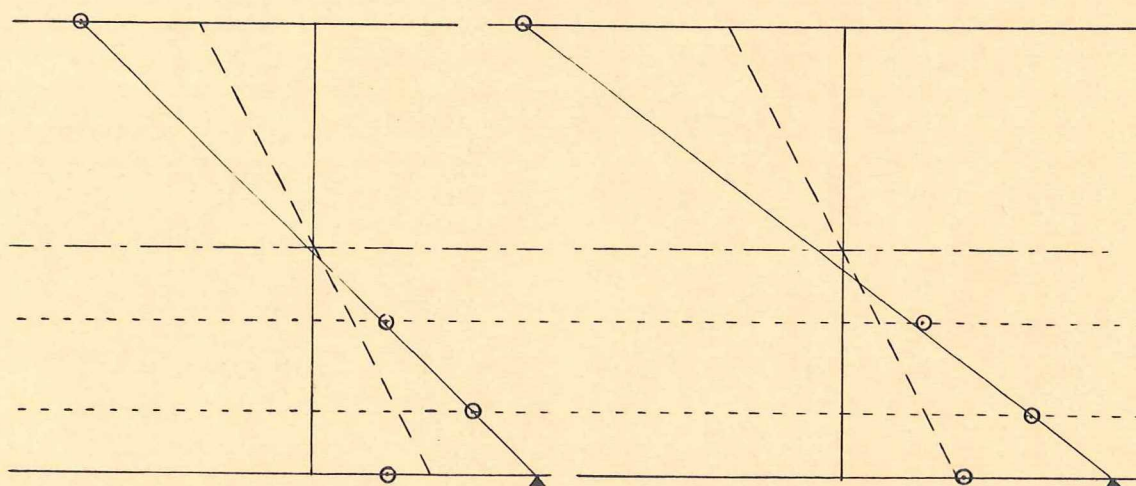


VERBAND TUSSEN STAAFWEERSTAND EN DE SOM VAN DE GROOTSTE REKKEN IN DE UITERSTE VEZELS VAN DE MEETDOORSNEDE VOOR STAAF N° 10

fig. 33^a

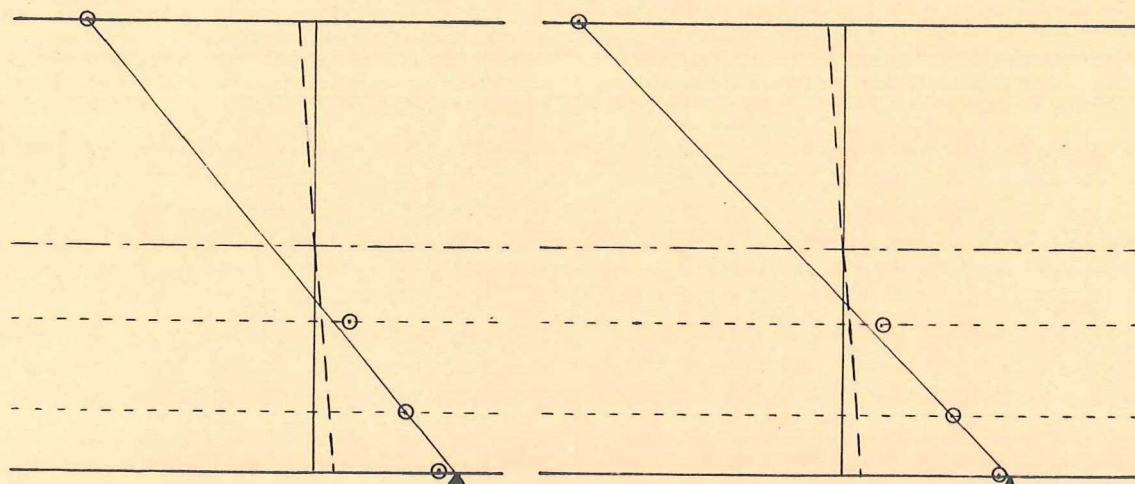


NA PULS 3



NA PULS 7

NA PULS 8

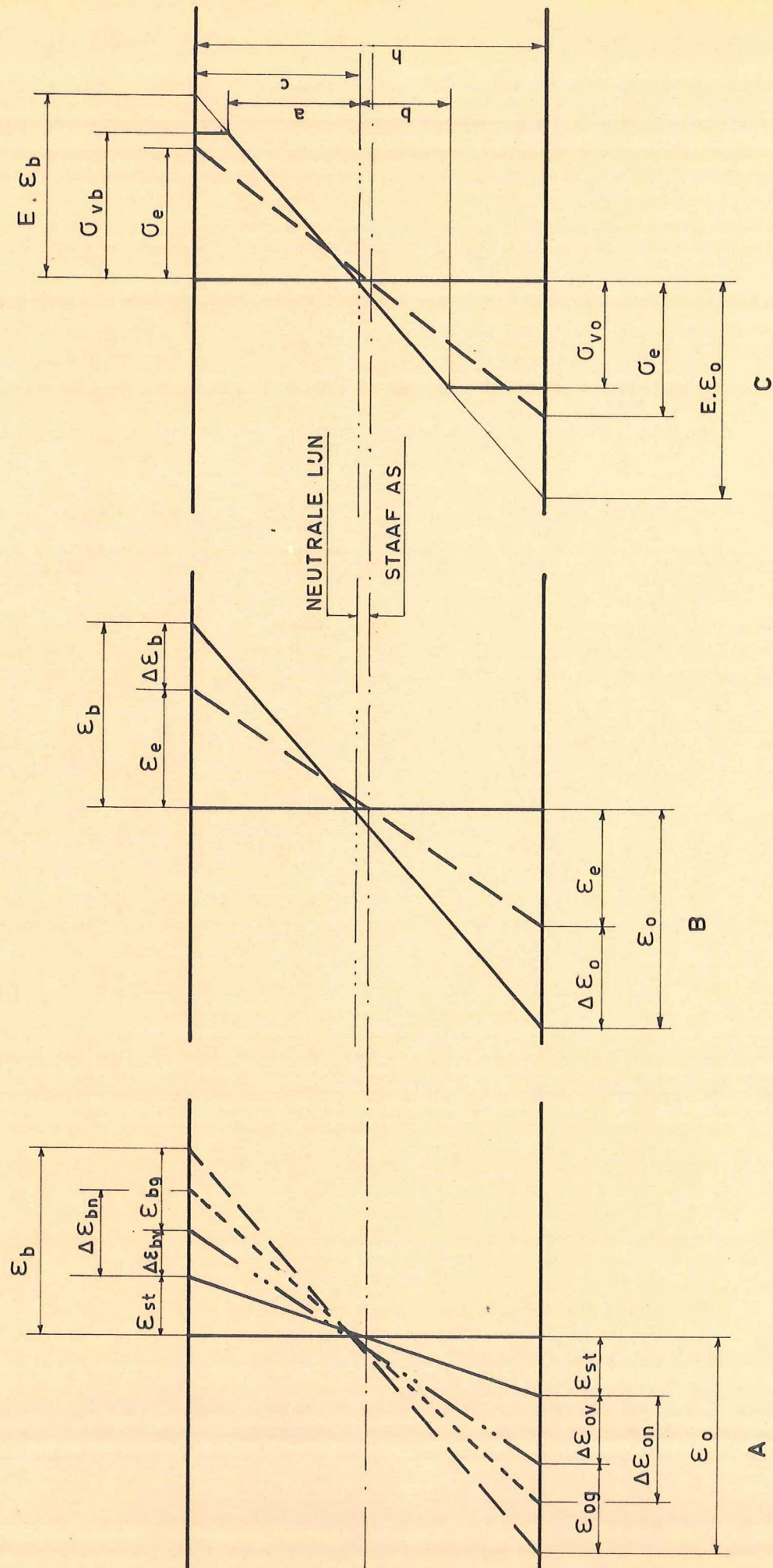


NA PULS 16

NA PULS 17

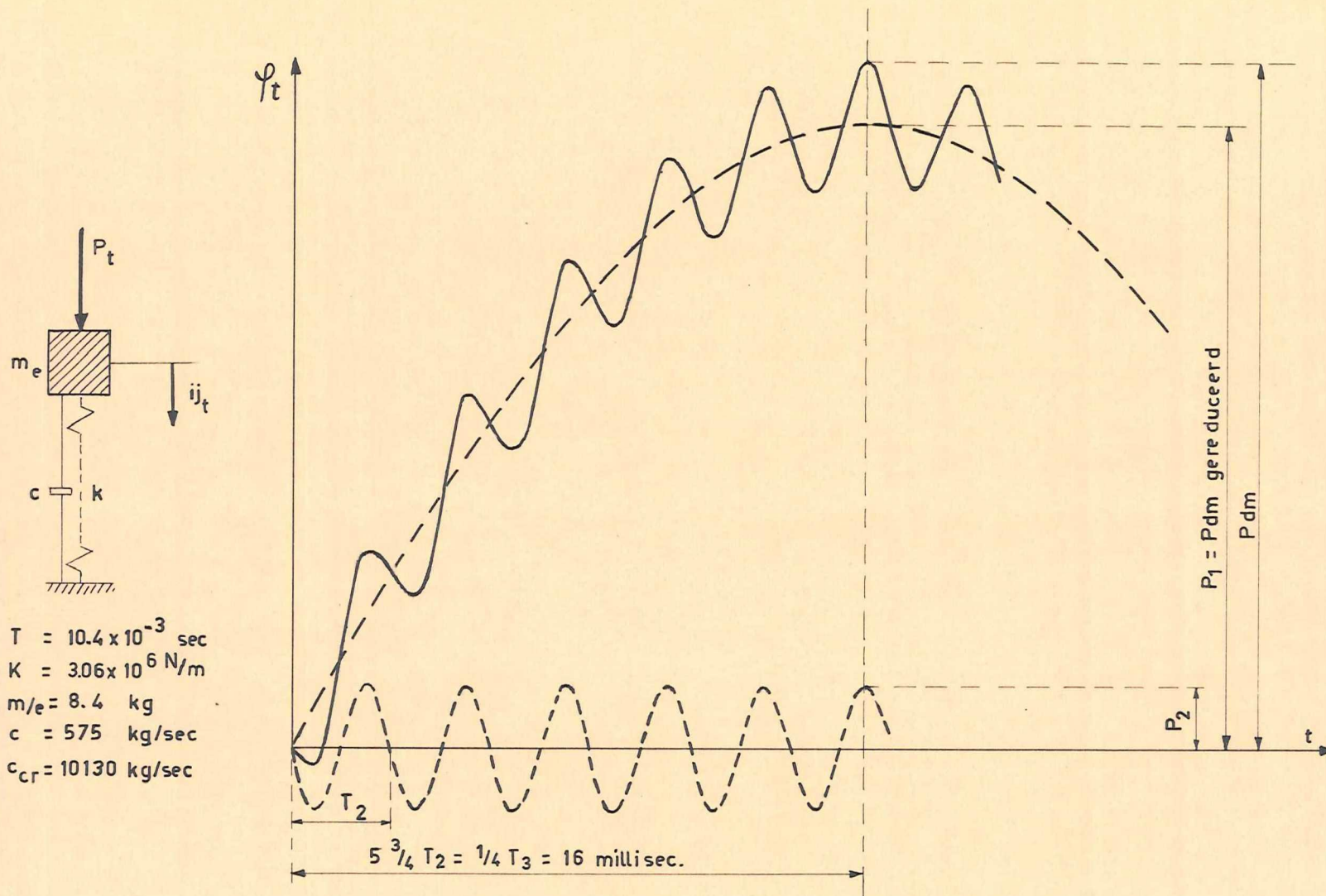
fig. 33^b

REST-REKDIAGRAMMEN VOOR STAAF N° 10



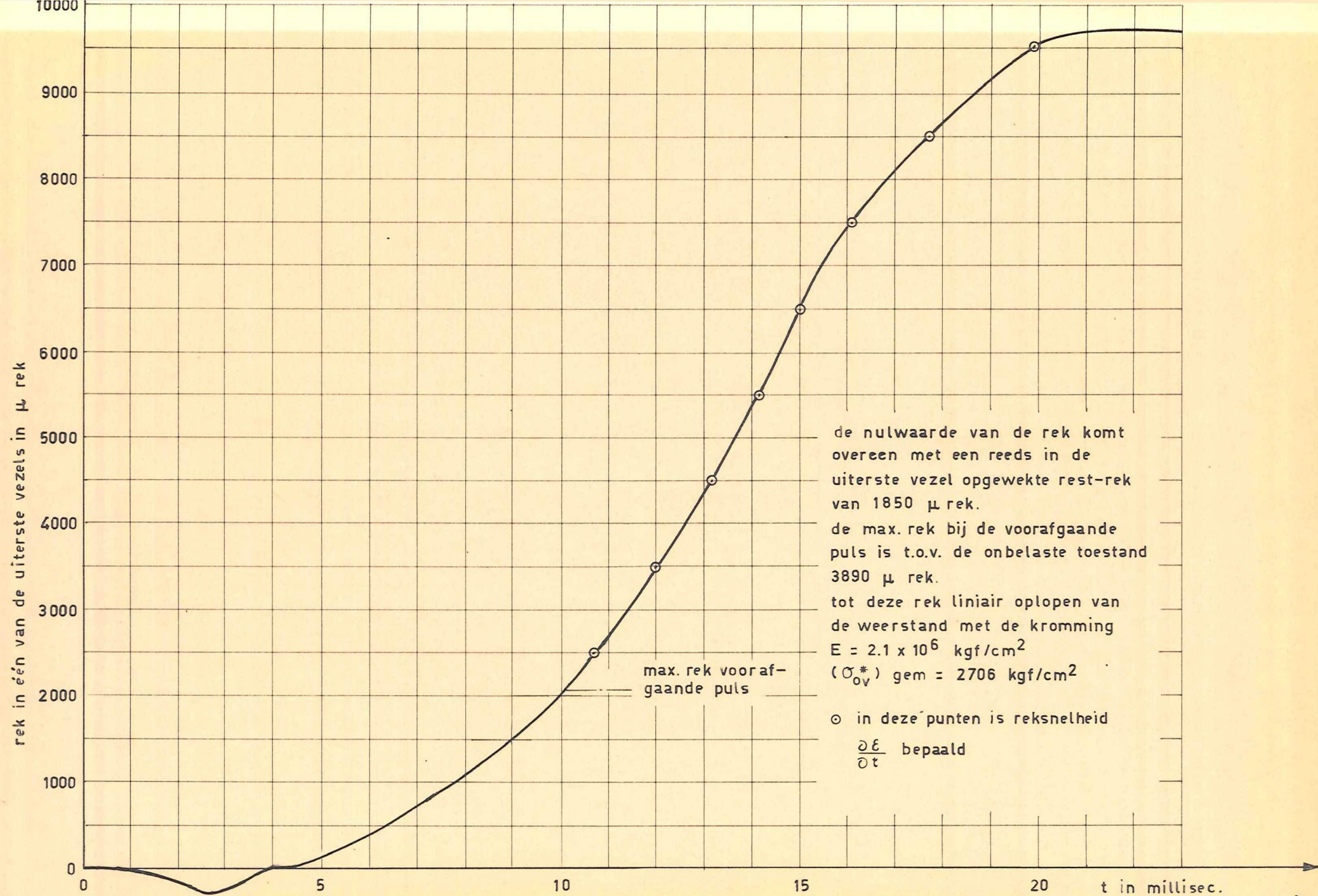
REK - EN SPANNINGSDIAGRAMMEN VOOR HET BEREKENEN VAN DE VERHOOGDE VLOEISPANNING

fig. 34



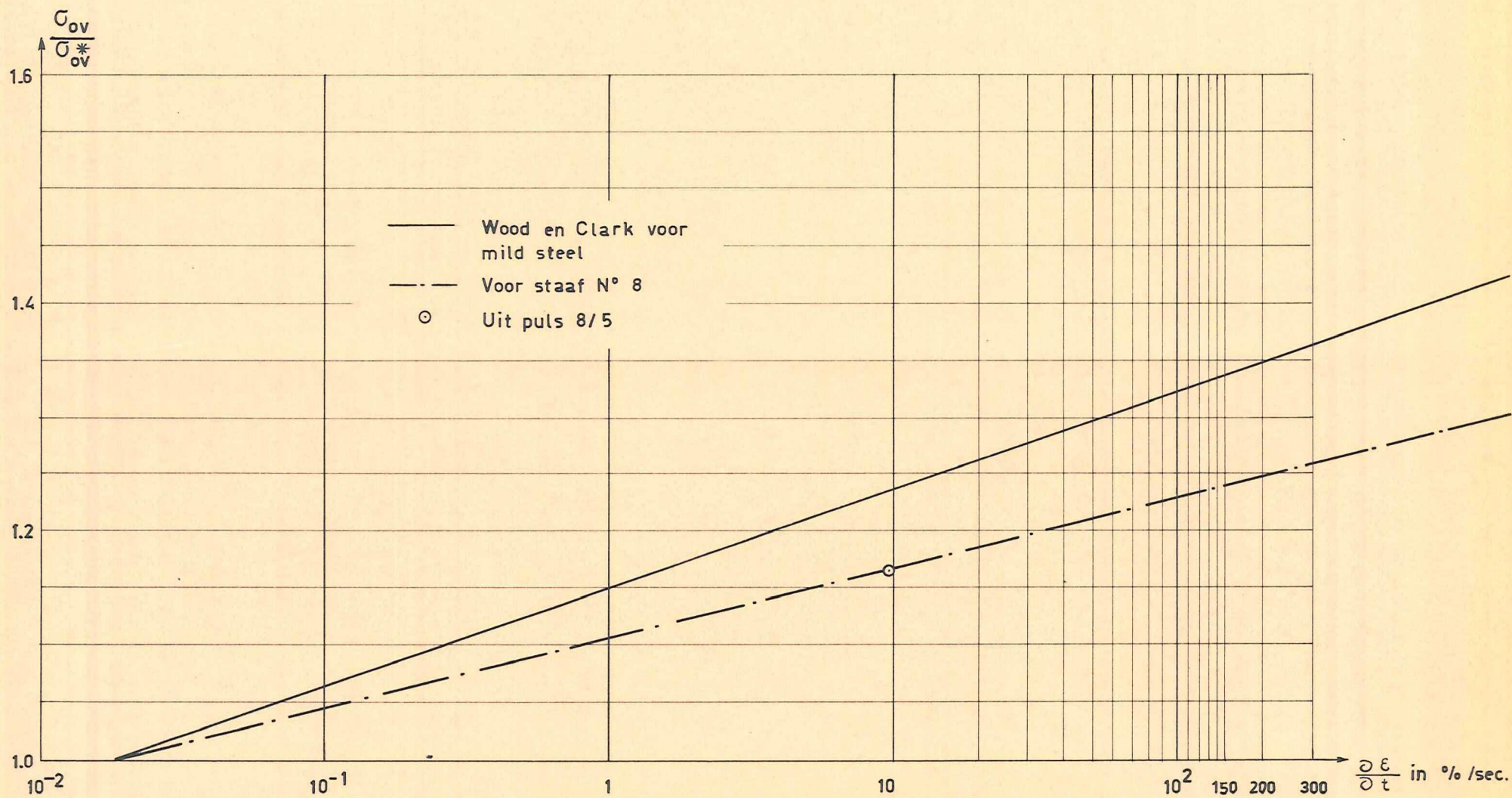
GESCHEMATISEERDE SYSTEEM, DAT DOOR DE BELASTINGSPULS IN DE DYNAMOMETER WORDT BELAST
GESCHEMATISEERDE VERLOOP VAN EEN BELASTINGSPULS

fig. 35



VERLOOP REK IN ÉÉN UITERSTE VEZEL VAN DE MEETDOORSNEDE BIJ PULS 13 OP STAAF 8

fig. 36



VERBAND TUSSEN REKSNELHEID BIJ HET UITVLOEIEN EN VERHOGING ONDERSTE VLOEISPANNING

fig. 37

Tabel 1: Materialen en proefs

Materiaal		Vervaardigd	Samenstelling in %				
No.	Specificatie		Mn	P	S	Si	N
1	A.S.T.M. A 7 ($\approx$ St44)	Woelig staal	0,35	0,021	0,052	0,01	0,014
2	idem	idem					
3	A.S.T.M. A 7 ($\approx$ St44)	Gedeeltelijk gekalmeerd staal	"	"	"	"	"
4	idem	idem	0,51	0,033	0,036	0,03	0,013
5	A.S.T.M. A 7	-	"	"	"	"	"
			-	-	-	-	-
6	idem	-	-	-	-	-	-
7	Mild Steel ($\approx$ St.37)	-	0,43	0,018	0,046	0,07	-

Tabel: 2 Bepaling van de waarde van E aan de hand van statische buigproeven.

Uit het belastings- en meetschema van fig. 22 is voor elastische vervormingen voor de buigstijfheid van de staven af te leiden:

$$EI = 378,7 \times 10^4 \frac{P}{\delta} \text{ kg. cm}^2.$$

Hierin is: P de belasting in kg.

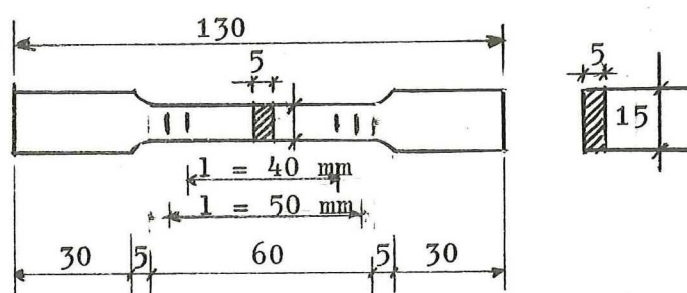
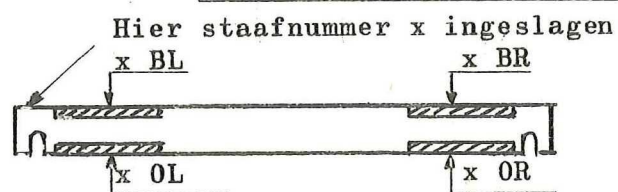
δ de relatieve zakking bij het middelste klokje ten opzichte van het buitenste klokje.

De nominale afmetingen van de doorsnede zijn: B = 2,0 cm H = 4,0 cm.
De nominale waarde van het traagheidsmoment is: I = 10,67 cm⁴.

Staaf N ^o	P in kg	δ in 10 ⁻⁴ cm	EI in 10 ⁶ kg. cm ²	E berekend met nominale waarde voor I in kg cm ²
1	800	138	22,0	2,06 x 10 ⁶
2	800	142	21,3	2,00 x 10 ⁶
3	800	126	24,0	2,25 x 10 ⁶
4	800	129	23,5	2,20 x 10 ⁶
5	800	130	23,3	2,09 x 10 ⁶
6	800	141	21,5	2,01 x 10 ⁶
7	800	145	20,9	1,96 x 10 ⁶
8	800	129	23,5	2,20 x 10 ⁶
9	700	123	21,6	2,02 x 10 ⁶
10	600	117	19,4	1,82 x 10 ⁶

E_{gem.} =
2,06 x 10⁶
kg/cm².

Tabel 2a. Resultaten statische trekproeven op proefstukken uit de dynamisch belaste buigstaven en op proefstuk uit de partij materiaal.



Proefstuk bij $l = 40$ mm ongeveer een rechthoekige dp 5 staaf.

Nummer	σ_{bv}^* in kgf/cm ²	σ_{ov}^* in kgf/cm ²	σ_{max}^* in kgf/cm ²	gemiddelde σ_{ov}^* in kgf/cm ²	$l = 40$ mm ϵ_{br} in %	$l = 50$ mm ϵ_{br} in %
5 BL	2880	2820	4160	2892	40,0	35,0
5 BR	2904	2873	4213		33,0	30,0
5 OL	2980	2929	4323	2910	35,0	32,0
5 OR	2902	2892	4337		37,5	34,5
6 BL	2889	2869	4067	2812	34,5	30,0
6 BR	2786	2756	3950		32,0	28,5
6 OL	2836	2786	4119	2813	34,0	30,0
6 OR	2860	2840	4160		33,0	29,5
7 BL	3186	3158	4377	3052	--	32,1
7 BR	3028	2946	4173		--	32,9
7 OL	2971	2942	4145	2947	--	31,3
7 OR	2963	2952	4102		--	31,3
8 BL	2745	2665	3997	2721	--	33,3
8 BR	2809	2778	4064		--	32,6
8 OL	2730	2718	3992	2690	--	31,5
8 OR	2672	2662	3998		--	33,3
9 BL	3020	2980	4240	2879	31,5	28,5
9 BR	2806	2778	4120		35,0	31,5
9 OL	3022	2942	4284	2894	33,5	29,5
9 OR	2877	2847	4177		36,5	31,5
10 BL	2798	2778	4091	2768	37,0	32,0
10 BR	2779	2759	4114		35,0	31,0
10 OL	2731	2711	3976	2748	35,0	31,0
10 OR	2924	2786	3978		35,0	30,5
Ronde dp 5 staaf wille- keurig uit partij-mate- riaal ge- haald.	2500	2365	3365	--	33,6	--

Tabel 3: Gegevens van de buigproefstaven No. 5 - No. 10.

Staaft No.	h gem in mm	b gem in mm	I gem in cm ⁴	EI gem ² in kg cm ² met E = 21 x 10 ⁶ kg/cm ²	h midden in mm	b midden in mm	Wel midden in cm ³	R [*] plast. in kgf	Max. dynamische weerstand R = 0,91 P _{dm} + 75 kgf (tabellen 4-9)	verhoging weerstand
5	40,08	12,03	6,455	13,56 x 10 ⁶	40,07	12,02	3,22	1018	1215 + 75 = 1290	1,267
6	40,01	12,03	6,421	13,91 x 10 ⁶	40,02	12,01	3,21	984	1215 + 75 = 1290	1,311
7	39,96	11,99	6,375	13,39 x 10 ⁶	39,95	11,98	3,19	1043	1169 + 75 = 1244	1,193
8	40,01	12,01	6,410	13,45 x 10 ⁶	40,01	12,01	3,20	946	1165 + 75 = 1240	1,311
9	40,02	12,02	6,420	13,49 x 10 ⁶	40,03	12,00	3,20	1009	1155 + 75 = 1230	1,219
10	40,01	12,04	6,426	13,91 x 10 ⁶	40,02	12,00	3,20	964	1165 + 75 = 1240	1,286

Tabel 4 Waarnemingen voor staaf N^o 5.

Afmetingen meetdoorsnede $B = 1,202$ cm $h = 4,007$ cm.

$P_{stat} = 75$ kgf.

$E = 2,1 \times 10^6$ kgf/cm².

$E_{stat} = 2946/Bh^2 = 152,7$ μ rek.

Puls	Gemeten waarden					Rek volgens 6.1 a en 6.1			Weerstand volgens hoofdstuk 6.2		Weerstand volgens 6.3, $R=0,91$ P_{dm} in kgf
	φ °	P_{dm} in kgf	$\epsilon_{bg} + \epsilon_{og}$ μ rek	$\Delta \epsilon_{bn}$ μ rek	$\Delta \epsilon_{on}$ μ rek	ϵ_{b+o} μ rek	$\Delta \epsilon_b$ μ rek	$\Delta \epsilon_o$ μ rek	$(\epsilon_b + \epsilon_o)$ $(\Delta \epsilon_b + \Delta \epsilon_o)$	R in kgf	
1	5°15 ¹	980	3850	19,2	14,4	4155	172	167	3816	937	892
2	6°15 ¹	1000	4270	124,8	91,3	4609	277	244	4088	1004	910
3	7°20 ¹	1085	5000	528,0	345,6	5522	681	498	4343	1066	987
4	7°20 ¹	1085	5000	806,4	499,2	6179	959	652	4575	1124	987
5	7°20 ¹	1095	5000	1065,6	652,8	6611	1218	805	4588	1145	996
6	7°20 ¹	1100	5000	1334,4	816,0	7024	1487	969	4568	1122	1001
7	15°45 ¹	1335	15400	7747,2	4953,6	17856	7900	5106	4850	1228	1215

Opmerkingen: 1. Valhamer bij optillen na slag 3 van $\varphi_0 \approx 6^\circ$ gevallen.
2. Strookjes bij slag 7 gevloeid. Rest-rek onbetrouwbaar.

Tabel 5: Waarnemingen voor staaf no.6 Afmetingen meetdoorsnede: $B = 1,201 \text{ cm}$
 $h = 4,002 \text{ cm}$ $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
 $P_{\text{stat}} = 75 \text{ kgf}$ $\varepsilon_{\text{stat}} = \frac{2946}{2} = 153,2 \text{ } \mu \text{rek}$

	Gemeten waarden					Rek volgens 6.1.a en 6.1.b			Weerstand vlg. hfdst. 6.2		Weerstand vlg. 6.3
	ρ_0	P_{dm} in kgf	$\varepsilon_{\text{bg}} + \varepsilon_{\text{og}}$ in μrek	$\Delta \varepsilon_{\text{bn}}$ μrek	$\Delta \varepsilon_{\text{on}}$ μrek	$\varepsilon_{\text{b}} + \varepsilon_{\text{o}}$ μrek	$\Delta \varepsilon_{\text{b}}$ μrek	$\Delta \varepsilon_{\text{o}}$ μrek	$(\varepsilon_{\text{b}} + \varepsilon_{\text{o}})$ $-(\Delta \varepsilon_{\text{b}} + \Delta \varepsilon_{\text{o}})$	R in kgf	$R=0,91 P_{\text{dm}}$ in kgf
10	$3^{\circ}15'$	760	3150	14,4	14,4	3456	168	168	3120	762	692
11	$3^{\circ}30'$	770	3150	14,4	14,4	3485	168	168	3149	772	701
12	$3^{\circ}45'$	785	3260	14,4	14,4	3595	168	168	3259	799	714
13	$4^{\circ}00'$	820	3420	14,4	9,6	3755	168	163	3424	839	746
14	$4^{\circ}15'$	840	3530	14,4	14,4	3860	168	168	3524	863	764
15	$4^{\circ}30'$	850	3530	19,2	28,8	3865	172	182	3511	860	774
16	$4^{\circ}45'$	690	3650	24,0	38,4	4004	177	192	3635	891	810
17	$5^{\circ}00'$	945	3800	24,0	43,2	4169	177	196	3796	930	860
18	$5^{\circ}30'$	995	3910	38,4	62,4	4284	192	216	3876	950	905
19	$5^{\circ}00'$	930	3810	48,0	72,0	4217	201	225	3791	929	846
20	$5^{\circ}30'$	975	3920	62,4	91,2	4346	216	244	3886	952	887
21	$6^{\circ}00'$	1015	4200	48,0	91,2	--	--	--	--	--	--
22	$6^{\circ}00'$	--	--	67,2	120,0	4646	220	273	4153	1018	924
23	$6^{\circ}00'$	--	--	91,2	124,8	--	--	--	--	--	--
24	$6^{\circ}00'$	1015	4240	110,4	139,2	4762	264	292	4206	1031	924
25	$6^{\circ}30'$	1100	4540	153,6	177,6	5096	307	331	4458		1001
26	$7^{\circ}00'$	--	--	264,0	225,6	--	--	--	--	--	--
27	$7^{\circ}00'$	1095	4960	393,6	273,6	5756	547	427	4782	1092	996
28	$7^{\circ}30'$	1120	5080	561,6	364,8	6054	715	518	4821	1181	1019
29	$7^{\circ}30'$	1115	5120	768,0	494,4	6353	921	648	4784	1172	1015
30	$7^{\circ}30'$	1115	5240	974,4	667,2	6809	1128	820	4861	1191	1015
31	$7^{\circ}30'$	1115	5350	1204,8	849,6	7298	1358	1003	4937	1210	1015
31	$17^{\circ}00'$	1335	12900?	14971,2	12216,0	?	15124	12369	?	?	1215

Opmerkingen: 1) Pulsen 1-9 met $\rho_0 = 3^{\circ}15'$; experimenten bevestiging belastingsblok aan proefstaaf.
 2) Pulsen 10-21 blok aan de staaf bevestigd met pen door staafas.
 3) Pulsen 19-20 door foute instelling ρ_0 herhaling voorgaande pulsen.
 4) Na puls 21 pen voor blok bevestiging $^{\circ}$ verwijderd.
 5) Puls 22 geen foto gemaakt.
 6) Puls 25 startschakelaar oscilloscoop geweigerd
 7) Puls 31. Topwaarde rek buiten foto. Topwaarde geconstrueerd met andere registraties.
 Rest-rek door vloeien strookjes onbetrouwbaar.

Tabel 6. Waarnemingen voor staat N^o 7. Afmetingen meetdoorsnede: B = 1,1

$$h = 3,995 \text{ cm}$$

$$P_{\text{stat}} = 75 \text{ kg}$$

$$E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{\text{stat}} = 2946 / b h^2 = 154,1 \text{ } \mu\text{rek.}$$

Puls	Gemeten waarden					Rek volgens 6.1 a en 6.1 b			Weerstand volgens hoofdstuk 6.2		Weerstand volgens a.3. R=0,91 P _{dm}
	φ_0	P _{dm} in kg	$\epsilon_{bg} + \epsilon_{og}$ μrek	$\Delta \epsilon_{bn}$ μrek	$\Delta \epsilon_{on}$ μrek	$\epsilon_o + \epsilon_b$ μrek	$\Delta \epsilon_b$ μrek	$\Delta \epsilon_o$ μrek	$(\epsilon_b + \epsilon_o) -$ $(\Delta \epsilon_b + \Delta \epsilon_o)$	R in kg	R in kg
1	3°30 ¹	750	2940	0	9,6	3248	154	164	2930	595	683
2	3°45 ¹	795	2960	0	14,4	3278	154	169	2955	600	723
3	4°00 ¹	815	3075	0	19,2	3398	154	173	3071	624	742
4	4°15 ¹	835	3150	0	28,8	3477	154	183	3140	638	761
5	4°30 ¹	840	3330	-4,8	28,8	3667	149	183	3335	677	765
6	4°45 ¹	875	3450	-4,8	38,4	3782	149	193	3440	699	797
7	5°00 ¹	925	3510	-4,8	48,0	3852	149	202	3501	711	842
8	5°15 ¹	935	3550	-4,8	57,6	3901	149	212	3600	731	852
9	5°30 ¹	945	3660	0	67,2	4021	154	221	3646	741	861
10	5°45 ¹	970	3860	-4,8	86,4	4235	149	241	3845	781	883
11	6°00 ¹	975	3870	-4,8	105,6	4260	149	260	3851	782	888
12	6°15 ¹	1000	3910	0	129,6	4319	154	284	3881	788	910
13	6°30 ¹	1005	4090	0	163,2	4528	154	317	4057	824	915
14	6°45 ¹	1025	4140	0	220,8	4611	154	375	4082	829	934
15	7°00 ¹	1060	4250	-9,6	326,4	4779	145	481	4153	843	964
16	7°30 ¹	1090	4400	-19,2	484,8	5025	135	639	4251	863	992
17	8°00 ¹	1100	4650	-28,8	729,6	5424	125	884	4415	897	1001
18	8°00 ¹	1080	4650	38,4	979,2	5659	193	1133	4333	880	983
19	8°00 ¹	1080	4760	196,8	1233,6	6086	351	1388	4347	883	983
20	8°00 ¹	1080	4960	379,5	1468,8	6699	534	1623	4542	922	983
21	16°30 ¹	1285	13480	3878,4	6897,6	15637	4033	7052	4552	925	1169
22	16°30 ¹	1340	16680	8851,2	-	-	-	-	-	-	1219
23	16°30 ¹	1310	17950	-	-	-	-	-	-	-	1202

Opmerkingen: 1. Vanaf puls 21 vloeien strookjes.

Rest-rek onbetrouwbaar.

Tabel 7. Waarnemingen voor staaf 8.

Afmetingen meetdoorsnede $B = 1,201 \text{ cm}$ $h = 4,001 \text{ cm}$

$P_{\text{stat}} = 75 \text{ kg}$

$\epsilon_{\text{stat}} = 2946/Bh^2 = 153,3 \text{ } \mu\text{-rek}$

$E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

puls						Volgens (6.1.a) en (6.1.b)			berekende dyn. weerstand vlg. hfdst. 6.2	gemeten weerstand volgens 6.3	
	P_o	P_{dm} in kg	$\epsilon_{\text{bg}} + \epsilon_{\text{og}}$ in $\mu\text{ rek}$	$\Delta \epsilon_{\text{bn}}$ in $\mu\text{ rek}$	$\Delta \epsilon_{\text{on}}$ in $\mu\text{ rek}$	$(\epsilon_o + \epsilon_b)$ in $\mu\text{ rek}$	$\Delta \epsilon_b$ in $\mu\text{ rek}$	$\Delta \epsilon_o$ in $\mu\text{ rek}$	$(\epsilon_b + \epsilon_o) - (\Delta \epsilon_b + \Delta \epsilon_o)$	R in kg	$R = 0,91 P_{\text{dm}}$ in kg
1	3°00'	705	2710	- 14,4	+ 4,8	3017	139	158	2720	666	642
2	3°30'	725	2880	- 14,4	+ 14,4	3177	139	168	2860	700	661
3	4°00'	820	3100	- 9,6	+ 24,0	3407	144	177	3086	755	747
4	4°30'	845	3300	- 9,6	+ 62,4	3621	144	216	3261	798	769
5	5°00'	860	3590	+ 4,8	+ 139,2	3949	158	292	3499	832	783
6	5°30'	905	3840	+ 38,4	+ 292,8	4291	192	446	3653	894	824
7	6°00'	955	4100	+ 105,6	+ 537,6	4738	259	691	3788	927	869
8	6°00'	955	4240	+ 182,4	+ 734,4	5190	336	888	3966	970	869
9	6°00'	960	4130	+ 283,2	+ 902,4	5353	437	1056	3860	945	874
10	6°00'	955	4190	+ 408,0	+ 1056,0	5682	561	1209	3908	956	869
11	7°00'	1010	4730	+ 710,4	+ 1420,8	6501	864	1574	4063	994	919
12	8°00'	1110	5340	+ 1320,0	+ 2073,6	7778	1473	2227	4078	998	1010
13	16°30'	1280	19000	---	---	22700	---	---			1165

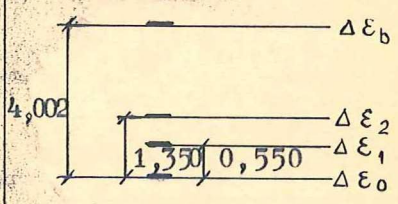
Tabel 8. Waarnemingen voor staaf no.9 Afm. meetdsn. $B = 1,200 \text{ cm}$ $h = 4,003 \text{ cm}$
 $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$$P_{\text{stat}} = 75 \text{ kg}$$

$$\xi_{\text{stat}} = 2946/Bh^2 = 153,2 \text{ } \mu\text{rek}$$

puls	Gemeten waarden					Rek volgens 6.1.a en 6.1.b			Weerstand vlgs. hoofdstuk 6.2	Hoofdstuk 6.3 $R = 0,91 P_{\text{dm}}$	
	ρ_0	P_{dm} in kg	ξ_{og} μrek	$\Delta\xi_{\text{bn}}$ μrek	$\Delta\xi_{\text{on}}$ μrek	$\xi_0 + \xi_b$ μrek	$\Delta\xi_b$ μrek	$\Delta\xi_o$ μrek	$(\xi_b + \xi_o) -$ $(\Delta\xi_b + \Delta\xi_o)$	R in kg	R in kg
1	3°00'	675	1430	0	9,6	2957	153	163	2641	646	614
2	3°30'	710	1510	0	24,0	3322	153	177	2992	732	656
3	4°00'	765	1620	14,4	62,4	3546	168	216	3162	774	696
4	4°30'	815	1780	33,6	139,2	3886	187	292	3407	834	742
5	5°00'	855	1880	62,4	220,8	4186	216	374	3596	880	778
6	5°30'	885	1960	139,2	340,8	4567	292	494	3781	925	806
7	5°30'	885	1950	196,8	417,6	4667	350	571	3746	917	806
8	5°30'	875	1970	235,2	480,0	4837	388	633	3816	934	797
9	5°30'	880	1930	273,6	528,0	4872	427	681	3764	921	802
10	5°30'	880	1950	312,0	561,6	5013	465	715	3833	938	802
11	5°30'	880	1960	340,8	595,2	5095	494	748	3853	943	802
12	5°30'	885	1945	379,2	633,6	5132	532	787	3813	933	806
13	5°30'	885	1945	412,8	657,6	5219	566	811	3842	940	806
14	5°30'	875	1945	441,6	681,6	5272	595	835	3842	940	797
15	6°00'	935	2080	518,4	681,6	5666	672	835	4159	1018	852
16	6°00'	945	2100	585,6	768,0	5687	739	921	4027	985	861
17	7°00'	1020	2340	777,6	1012,8	6287	931	1166	4190	1025	928
18	7°00'	1015	2350	945,6	1190,4	6787	1099	1344	4344	1063	924
19	7°00'	1015	2340	1099,2	1334,4	7132	1252	1488	4392	1075	924
20	7°00'	1015	2330	1248,0	1468,8	7414	1401	1622	4391	1074	924
21	8°00'	1085	2580	1598,4	1795,2	8207	1752	1948	4507	1103	978
22	16°30'	1270	7930	8006,4	7507,2	20256	8159	7660	4437	1086	1156

Opmerking: Puls 22 vloeien strookjes; rest-rek niet betrouwbaar.

Puls No.	Gemeten waarden and volgens stuk 6.3				Opmerkingen
	φ_0	P_{dm} in kg	ϵ_{og} in μrek	$\Delta \epsilon_{on}$ 0,91 P_{dm}	
1	3° 00'	690	1385	28	$\Delta \epsilon_0$ bij 6.1 a en 6.1 b is de berekende $\Delta \epsilon_{on}$ uit $\Delta \epsilon_{bn}$ en $\Delta \epsilon_{ln}$  $\Delta \epsilon_{on} = \frac{4,002}{4,002 - 0,550} [\Delta \epsilon_{bn} + \Delta \epsilon_{ln}] - \Delta \epsilon_{bn}$ Puls 18 vloeien strookjes. Restrek niet betrouwbaar.
2	3° 30'	765	1535	07	
3	4° 00'	830	1660	56	
4	4° 30'	865	1730	38	
5	5° 00'	960	1825	74	
6	5° 30'	985	1910	08	
7	6° 00'	1040	2080	47	
8	6° 30'	1030	2155	38	
9	6° 30'	1050	2140	56	
10	6° 30'	1035	2120	43	
11	6° 30'	1030	2155	38	
12	6° 30'	1045	2175	52	
13	6° 30'	1035	2175	43	
14	7° 00'	1090	2285	22	
15	7° 30'	1115	2500	47	
16	7° 30'	1115	2500	47	
17	7° 30'	1105	2500	27	
18	16° 30'	1280	9550	165	

Tabel 10: Berekening verhoogde vloeispanningen en vloeipuntsverhogingen bij snel belasten volgens hoofdstuk 6.1.

Staaft N ^o	Puls N ^o	Waarden in μ rek					Waarden in cm				Waarden in kgf/cm ²				$\frac{\sigma_{vb}}{\sigma_{vb}^*}$	$\frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}^*}$	Gem. $\frac{\sigma_v}{\sigma_v^*}$	Gemeten bij $\frac{de}{dt}$ in %/sec.
		$\epsilon_o + \epsilon_b$	$\Delta \epsilon_b$	$\Delta \epsilon_o$	ϵ_b	ϵ_o	h	c	b	d	σ_{vb}	σ_{vo}	Gem. σ_{vb}^*	Gem. σ_{vo}^*				
5	2	4610	277	244	2322	2288	4,007	2,017	1,460	1,393	3363	3525	2892	2910	1,17	1,21	1,19	
6	21	4645	220	273	2297	2349	4,002	1,978	1,387	1,507	3673	3380	2812	2813	1,30	1,20	1,25	
6	26	5756	547	427	2938	2818	4,002	2,043	1,370	1,217	3676	4139	2812	2813	1,31	1,47	1,39	
7	11	4260	149	260	2075	2185	3,995	1,946	1,347	1,661	3720	3017	3052	2947	1,22	1,08	1,15	
8	5	3949	158	292	1908	2041	4,001	1,933	1,282	1,654	3428	2657	2721	2690	1,26	0,99	1,14	0,95
8	12	7778	1473	2227	3512	4266	4,001	1,807	0,636	0,876	3577	2597	2721	2690	1,31	0,98	1,15	
9	6	4466	292	494	2132	2334	4,003	1,911	1,137	1,478	3463	2664	2879	2894	1,20	0,89	1,05	
10	8	4958	427	358	2510	2445	4,002	2,028	1,367	1,263	3285	3556	2768	2748	1,19	1,29	1,24	
10	17	8492	2462	1514	4720	3772	4,002	2,224	0,914	0,633	2820	4072	2768	2748	1,02	1,48	1,25	

Opmerkingen: 1. De berekeningen voor staaft 10 zijn uitgevoerd met uit de gemeten rest-rekdiagrammen bepaalde waarden voor $\Delta \epsilon_o$. Terwijl de rest-rekken voor het onderste strookje zijn gecorrigeerd, moest worden aangenomen dat het rekverloop met dit strookje wel juist werd gemeten. Dit is waarschijnlijk wel goed, omdat bij vergelijken van de foto's van staaft 10 met die van overeenkomstige belastingen op andere staven geen belangrijke afwijkingen blijken.

Tabel 11: Berekening van het weerstandsverloop uit het gemeten rekverloop voor puls 13 op staaf 8.

$\varepsilon(t)$ in μ rek t.o.v. nullijn rekregistratie	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ in %/sec bij $\varepsilon(t)$	σ_{ov} volgens fig. 57	σ_{ov} in $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ($\sigma_{ov}^{\pm} = 2706 \text{ kgf/cm}^2$).	$\varepsilon_{\mu v}$ in μ rek ($\Delta \varepsilon + \varepsilon_t$)	a in ccm	R in kgf.
2040	71	1,226	3318	3890	0,813	1096
2500	71	1,226	3318	4350	0,727	1109
3500	84	1,251	3331	5350	0,593	1130
4500	97	1,256	3345	6350	0,519	1145
5500	112	1,240	3355	7350	0,435	1154
6500	112	1,240	3355	8350	0,383	1150
7500	77	1,229	3326	9350	0,339	1146
8500	57	1,220	3301	10350	0,304	1145
9500	32	1,205	3261	11350	0,274	1133
9717	0	1	2706	11367	0,227	942